

**VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroniky**

**Snímače polohy – laboratorní úloha**  
**Position Sensors – Laboratory Task**

**2013**

**Vojtěch SALZMANN**

## Zadání bakalářské práce

Student: **Vojtěch Salzmann**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika  
Téma: Snímače polohy - laboratorní úloha  
Position Sensors - Laboratory Task

### Zásady pro vypracování:

1. Uveďte způsoby měření polohy v oblasti elektrických pohonů. Zaměřte se na inkrementální snímač a resolver.
2. Podle pokynů vedoucího navrhnete laboratorní přípravek pro ověřování činnosti výše uvedených snímačů.
3. Přípravek realizujte a měřením ověřte jeho správnou činnost.
4. Vypracujte vzorovou laboratorní úlohu pro měření na realizovaném přípravku.

### Seznam doporučené odborné literatury:

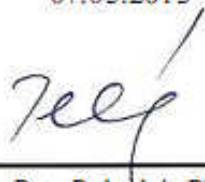
Dle pokynů vedoucího závěrečné práce

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Pavelek, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013



doc. Ing. Petr Palačský, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

*Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.  
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.*

V Ostravě dne 7. 5. 2013

*Vojtěch Salzman*  
.....

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Pavelkovi, Ph.D. za veškerou pomoc a praktické rady, které mi během mé práce poskytl.

**Abstrakt**

Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh a realizaci přípravku pro měření polohy hřídele pomocí resolveru a inkrementálního rotačního snímače (IRC). Přípravek by měl být používán pro školní laboratorní měření, neboť umožňuje jednoduše ukázat funkci zmíněných typů snímačů a změřit typické výstupní průběhy pomocí osciloskopu. V přístroji jsou použity běžné analogové a logické integrované obvody, pro řízení a výpočty jsou použity MCU řady Atmel AVR. Přípravek pro svou činnost nepotřebuje žádné další přístroje (zdroje, generátory apod.).

**Klíčová slova**

resolver, inkrementální rotační snímač, vyhodnocení polohy rotoru

**Abstract**

This thesis is focused on proposal and realization of device for measuring the position of rotating shaft with using resolver and incremental rotary coder (IRC). The device should be used for school laboratory measuring because it enables to easily demonstrate function of the above-mentioned position sensors and measure characteristic waveforms using oscilloscope. The device is assembled from usual analog and logic integrated circuits, microcontrollers (MCU) Atmel AVR series are used for controlling and computations. The device doesn't need other instruments (power supplies, signal generators etc.) for its correct function.

**Key Words**

resolver, incremental rotary coder, evaluating position of the rotating shaft

### Seznam použitých zkratek:

AC	střídavá veličina
A/D	analogově/digitální
BCD	binárně-desítkový kód
CNC	počítačové číslicové řízení
DC	stejnoseměrná veličina
DPS	deska plošného spoje
GND	zem
H	vysoká log. úroveň („log. 1“)
ICSP	sériové programování přímo v zapojení
IO	integrovaný obvod
IR	infračervený
IRC	inkrementální snímač
KO	klopný obvod
L	nízká log. úroveň („log. 0“)
LSB	nejnižší bit čísla
MCU	mikrokontrolér
MKO	monostabilní klopný obvod
MSB	nejvyšší bit čísla
MUX	multiplexer
NC	číslicové řízení
OC	otevřený kolektor
OZ	operační zesilovač
Q	kvadrant
R/D	resolver/digitální
Z	stav vysoké impedance

## Obsah:

1. Úvod .....	9
2. Inkrementální rotační snímač .....	10
2.1 Princip funkce a konstrukce snímače .....	10
2.2 Způsob zpracování dat ze snímače .....	14
2.3 Použití inkrementálních snímačů v praxi .....	16
3. Resolver .....	17
3.1 Princip funkce a konstrukce snímače .....	17
3.2 Způsoby měření .....	18
3.2.1 Měření polohy při buzení rotorového vinutí .....	18
3.2.2 Měření polohy při buzení statorových vinutí .....	22
3.3 Použití resolverů v praxi .....	27
4. Další typy snímačů polohy .....	28
5. Návrh a realizace přípravku pro měření polohy .....	29
5.1 Vyhodnocovací modul pro IRC .....	29
5.2 Vyhodnocovací modul pro resolver .....	36
5.3 Jednotka displeje .....	43
5.4 Napájecí zdroj a regulátor motorku .....	44
5.5 Konstrukční uspořádání .....	47
6. Vzorový protokol pro měření .....	49
7. Závěr .....	61
Použitá literatura: .....	62
Seznam příloh: .....	64



# 1. Úvod

Snímače polohy hrají důležitou roli v oblasti regulace elektrických pohonů, protože umožňují přesně určit natočení hřídele v daném okamžiku. To je velmi důležité v moderních průmyslových aplikacích, kdy jsou snímače polohy používány jako měřicí členy v číslicových řídicích systémech obráběcích strojů, které již dnes patří k běžnému standardu. Mezi nepoužívanější typy snímačů patří resolvery a inkrementální čidla. Oba zmiňované snímače umožňují velmi přesné měření, nicméně liší se principem funkce, a tudíž je potřeba použít různých metod pro vyhodnocení signálů a následné získání informace o poloze.

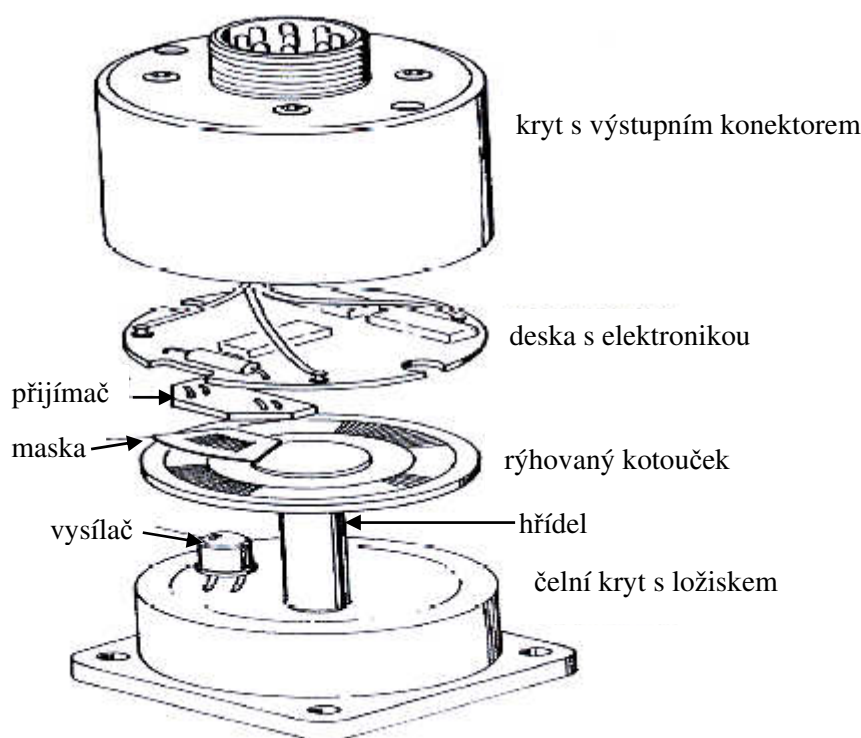
Snímače polohy se samozřejmě používají též v zařízeních běžně známé spotřební elektroniky, protože třeba otáčení kolečka u počítačové myši je snímáno zjednodušeným inkrementálním čidlem a na stejném principu fungují též „nekonečné potenciometry“ (tzv. rotační kodéry) používané na regulaci hlasitosti u audio přístrojů.

Vzhledem k důležitosti snímačů polohy v technické praxi je tato práce věnována základnímu popisu resolverů a inkrementálních snímačů, dále jsou popsány způsoby vyhodnocení polohy pomocí těchto snímačů. V další části je popsána konstrukce laboratorního přípravku pro názornou ukázkou funkce zmiňovaných snímačů. Přípravek se skládá z inkrementálního čidla a resolveru, které jsou poháněny malým stejnosměrným motorkem. Poloha hřídele získaná z jednotlivých snímačů je zobrazována na displeji a výstupní signály ze snímačů jsou vyvedeny na svorky, takže jsou snadno měřitelné. Protože přístroj má být používán v laboratorních cvičeních, je součástí této práce také vzorový protokol.

## 2. Inkrementální rotační snímač

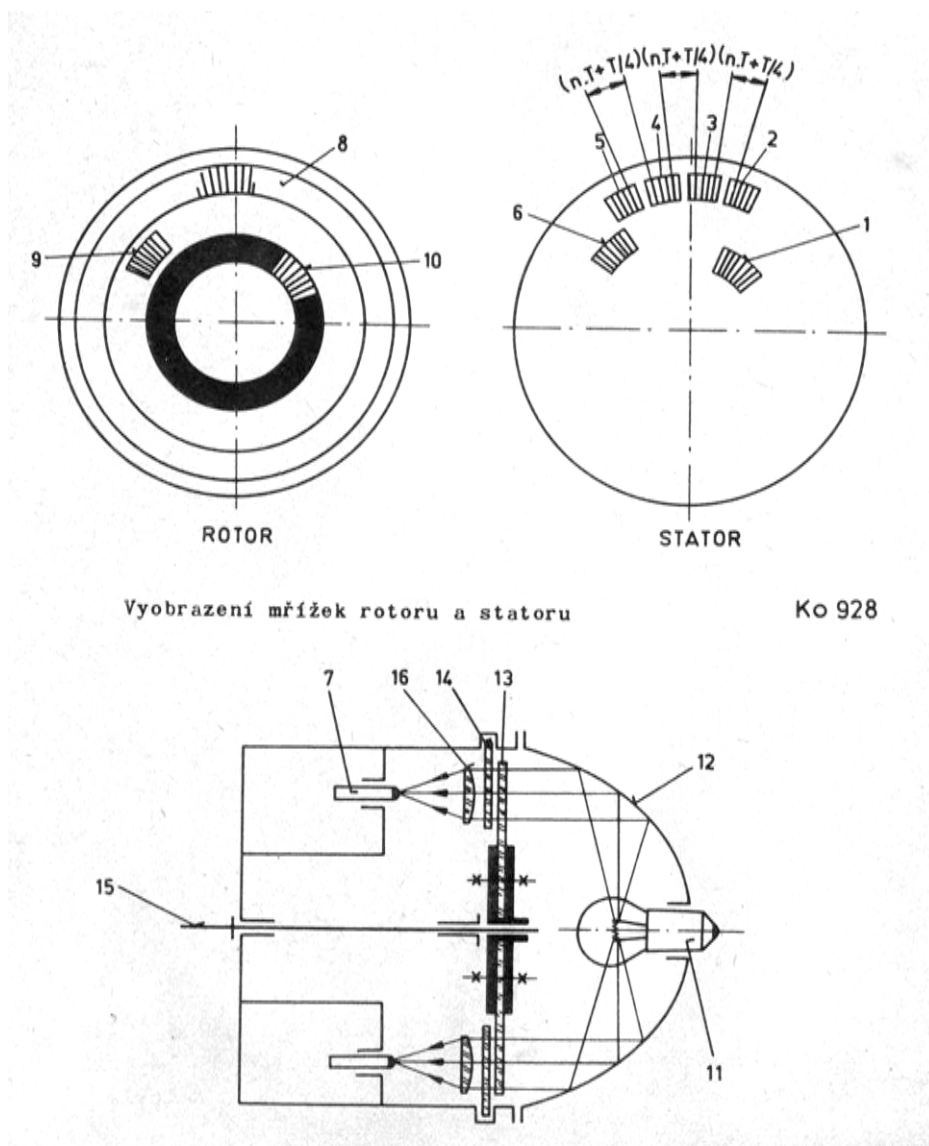
### 2.1 Princip funkce a konstrukce snímače

Inkrementální snímač patří mezi optoelektronické snímače, protože výstupní signál vzniká v důsledku přerušování světelného paprsku mezi vysílačem a přijímačem. Na hřídeli snímače je umístěn obvykle skleněný kotouček s vrypy, přes něž prochází světelný paprsek. Na obr. 1 jsou patrné jednotlivé součásti běžného inkrementálního snímače. Před přijímací fotonkou je umístěna maska, která usměrňuje paprsek tak, že z něj vybírá pouze úzkou část. To je důležité s ohledem na velmi jemné dílkování rýhovaného kotouče (několik tisíc vrypů na otáčku).



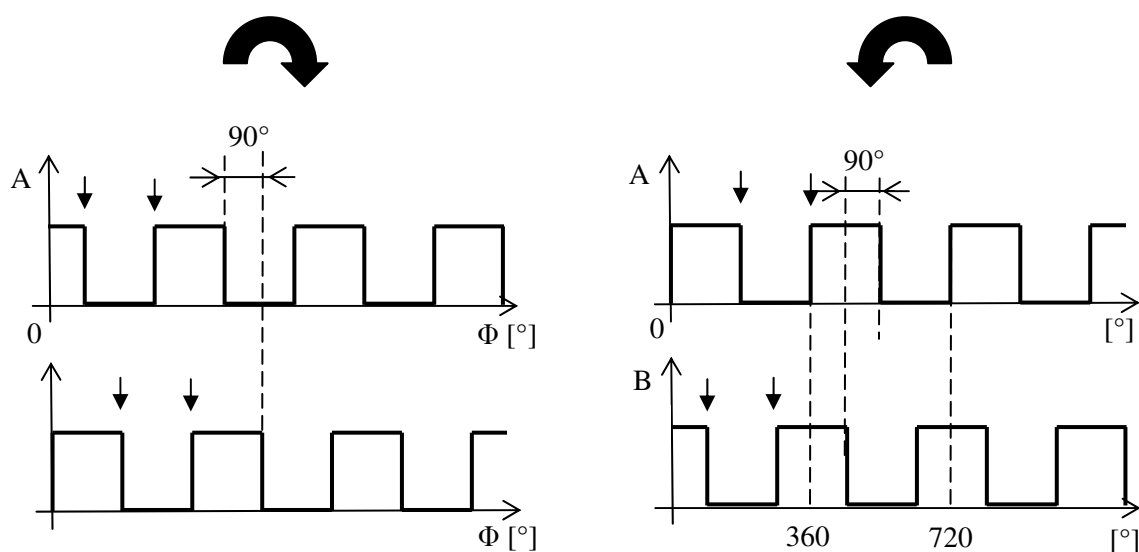
**Obr. 1 Rozložený inkrementální snímač**

Na obr. 2 je vyobrazen starší typ inkrementálního snímače IRC 110 používaný v obráběcích strojích v 80. letech minulého století. U tohoto typu snímače byla jako zdroj světla použita žárovka (11) umístěná do středu parabolického zrcadla (12) tak, aby byly odražené světelné paprsky rovnoběžné. Vrypy na rotorovém (8) a na statorovém kotouči (2, 3, 4, 5) mají stejné rozestupy. Procházející paprsky jsou pomocí čočky (16) směřovány do středu přijímacích fototranzistorů (7). Statorový kotouč (14) slouží jako maska. Žárovka musela být přesně centrována.



**Obr. 2 Inkrementální snímač staršího typu (IRC 110) [13]**

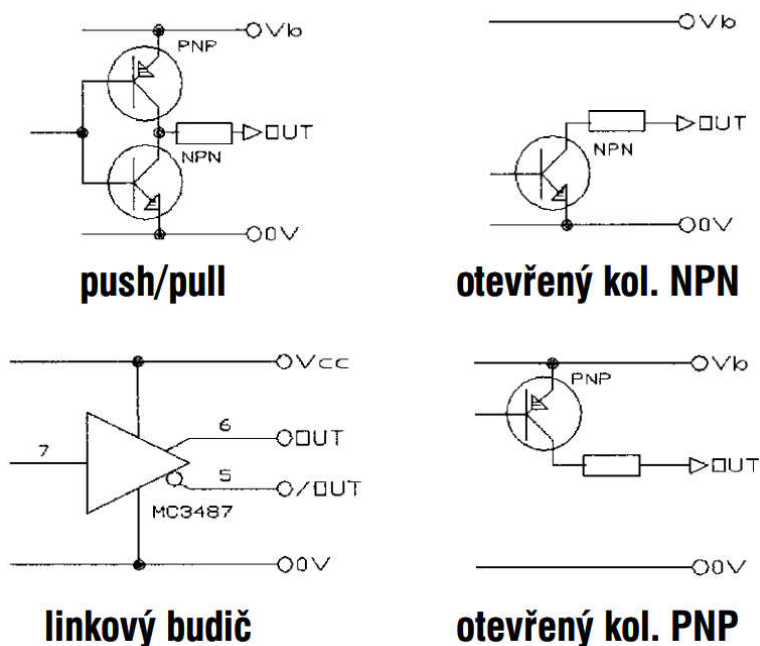
V současné době jsou jako vysílač a přijímač běžně používány infračervené polovodičové prvky (vysílací IR dioda a přijímací IR tranzistor). Ve snímači je vestavěna elektronika zajišťující napájení vysílací diody a tvorbu výstupního signálu. Snímač obsahuje více přijímačů rozmístěných tak, aby byl signál vzájemně posunut o  $90^\circ$  elektrických. Další přijímač slouží k vytváření tzv. nulového (referenčního) pulsu, který je generován 1x za otáčku při dané poloze natočení hřídele. Nulový puls bývá synchronní s některým z výstupních signálů A, B. Z obr. 3 vyplývá, že díky fázovému posunu mezi výstupními signály je možné rozpoznat směr otáčení hřídele snímače.



**Obr. 3 Výstupní signály inkrementálního snímače při různém směru otáčení**

Kromě základních signálů A, B a NUL jsou vyvedeny i příslušné negace těchto signálů /A, /B a /NUL. To umožňuje provádět kontrolu správnosti výstupních signálů a tím zjistit případnou závadu snímače nebo přívodního kabelu. Vhodným zapojením vstupních obvodů lze také potlačit rušení, což je vhodné při větší vzdálenosti mezi řídicím systémem a vlastním snímačem (desítky m).

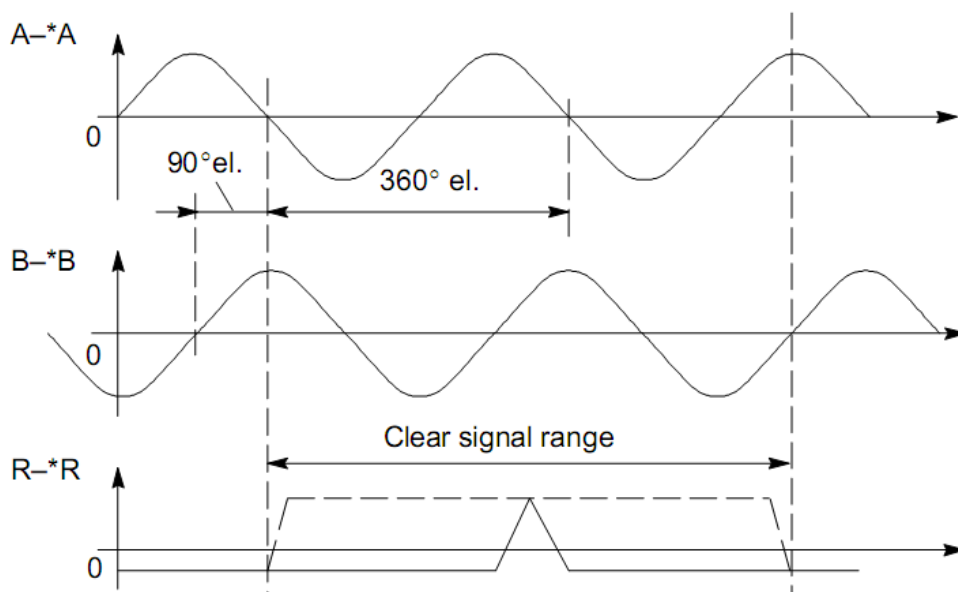
Z elektrického hlediska se snímače liší zapojením výstupních obvodů, které mohou být provedeny jako polomůstek („push/pull“), výstupy s otevřeným kolektorem typu NPN (spínána zem) nebo PNP (spínáno +), případně jako linkový výstup. Jednotlivé typy výstupů jsou zobrazeny obr. 4.



**Obr. 4 Typy výstupních obvodů**

Použitý typ inkrementálního snímače IRC 315 má výstup provedený jako linkový budič, což v daném případě znamená, že na výstupu snímače je vždy daný signál (OUT) i jeho negace (/OUT) v úrovni standardní 5V logiky TTL. Jiné typy snímačů mohou být napájeny napětím až 30 V, takže i výstupní napětí je patřičně vyšší. Při výstupech typu OC je třeba zajistit na vstupu systému správnou úroveň i při neaktivním výstupu snímače, kdy výstup není nikde připojen. To lze zajistit zapojením „zvedacího“ pull-up odporu pro OC typu NPN, případně „snižujícího“ pull-down odporu pro OC typu PNP.



Všechny doposud uvedené typy inkrementálních snímačů poskytovaly na výstupu obdélníkový signál, nicméně existují také speciální typy snímačů, které na výstupu poskytují sinusový signál, přičemž stále platí, že fázový posuv mezi signály jednotlivých kanálů je  $90^\circ$ . Výhodou je možnost přenášet signál ze snímače na větší vzdálenost (až 150 m), zřejmě v důsledku absence vyšších harmonických složek ve výstupním sinusovém signálu. Signál je v tomto případě veden dvouvodičově (ne proti zemi) a vstup systému je proveden jako diferenciální zesilovač. Podrobnější informace lze nalézt na stránkách společnosti LARM v příslušných katalogových listech [11]. Typické výstupní průběhy jsou na obr. 5. V současné době se u moderních pohonů lze setkat jak se „sinusovými“ IRC, tak se snímači s klasickým obdélníkovým výstupem. Běžně se IRC se sinusovým výstupem používají u některých pohonů Simodrive firmy Siemens [17]. Kmitočet výstupního signálu pochopitelně závisí na otáčkách a přesnosti snímače a může dosahovat až několik set kHz.



Obr. 5 Výstupní signály IRC se sinusovým výstupem

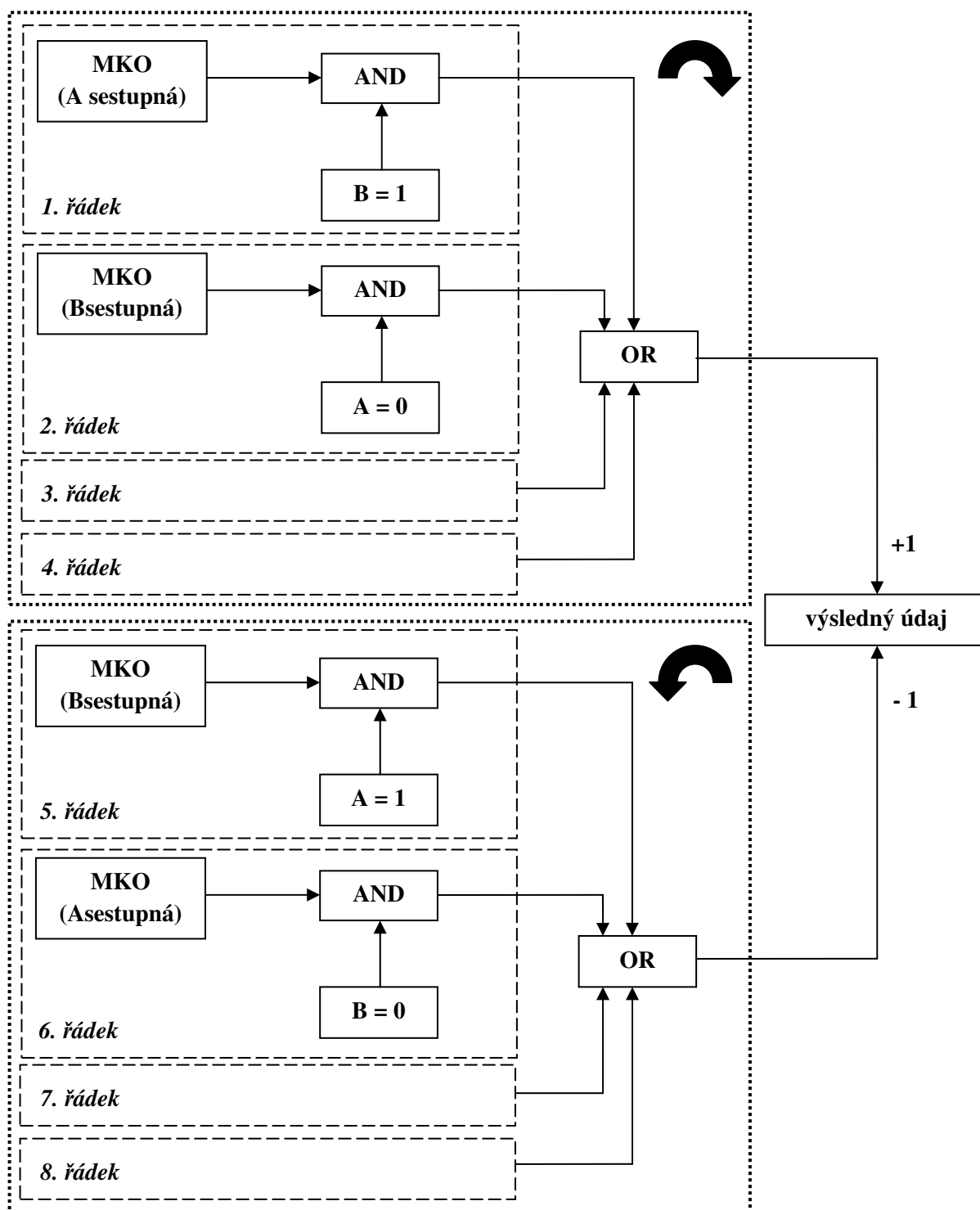
## 2.2 Způsob zpracování dat ze snímače

Jedním ze základních parametrů inkrementálního snímače je počet impulzů na 1 otáčku. Dříve byly používány „desítkové“ hodnoty (např. 100, 200, 500, 1000, 1250 imp/ot), nicméně dnes se častěji používají dvojkové násobky (512, 1024, 2048 imp/ot). Protože počet impulsů je dán drážkováním odměrného kotouče snímače, je maximální počet impulzů na otáčku omezen konstrukčními možnostmi (nejpřesnější snímače dosahují 6000 imp/ot). Vhodným zapojením vyhodnocovací logiky, kdy jsou vyhodnocovány nejen logické úrovně, ale i sestupné a náběžné hrany signálů ze snímače, lze čtyřnásobně zvětšit rozlišení snímače oproti jeho štitkové hodnotě. Máme-li tedy kupříkladu snímač s 1024 imp/ot (což odpovídá rozlišení  $0,35^\circ$ ), bude výsledné rozlišení 4096 imp/ot (tedy méně než  $0,1^\circ$ ). Na obr. 3 je malými šipkami naznačeno, kdy dochází k zaregistrování impulsu ze snímače – vždy při náběžné nebo sestupné hraně na výstupu A (resp. B), přičemž záleží na aktuální hodnotě výstupu B (resp. A).

Tab. 1 Podmínky pro vyhodnocení signálů z IRC			
směr otáčení	výstup A	výstup B	řádek
	1 → 0	1	1
	0	1 → 0	2
	0 → 1	0	3
	1	0 → 1	4
	1	1 → 0	5
	1 → 0	0	6
	0	0 → 1	7
	0 → 1	1	8

Princip vyhodnocovací logiky vychází ze zapojení pro vyhodnocení rychlosti a směru otáčení uvedeného v [8].

Reakci na náběžné a sestupné hrany signálu zajišťují MKO, na jejichž výstupech se objeví krátký impuls vždy při výskytu dané hrany na daném vstupu A nebo B. Každá podmínka je kontrolována jedním hradlem AND, výsledné impulzy řídící obousměrný čítač vznikají sloučením podmínek v hradlech OR.



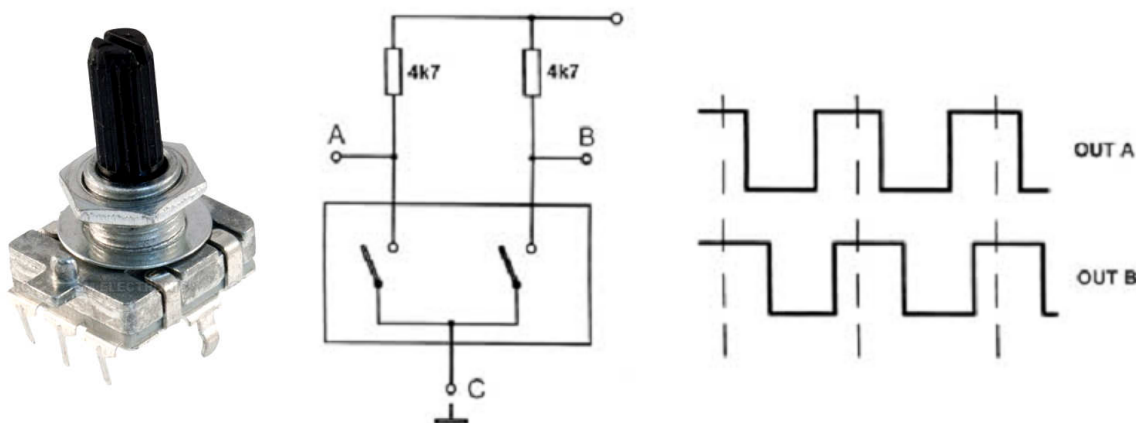
Obr. 6 Blokové schéma vyhodnocovací logiky inkrementálního snímače

## 2.3 Použití inkrementálních snímačů v praxi

IRC se používají v aplikacích, kde je nutné s velkou přesností znát informaci o aktuální poloze (příp. i rychlosti otáčení) nějaké hřídele, tj. v oblasti automatizace, robotiky a již zmíněných NC a CNC strojů. Řídicí systémy využívající IRC bývají doplněny různými kontrolními obvody pro zjišťování správné funkce snímače. Kromě obvodů hlídajících velikost napájecího napětí a odebíraného proudulze provádět kontrolu pomocí nulového pulsu vysílaného 1x za otáčku. Z funkce IRC totiž vyplývá, že mezi dvěma nulovými pulsy musí být počet dráhových pulsů daných typem snímače. Budeme-li uvažovat snímač s 1024 imp/ot, pak při otáčení daným směrem musí být mezi nulovými pulsy napočítáno 4096 dráhových pulsů ( $1024 \cdot 4 = 4096$ ). Pokud je výsledek odlišný, došlo někde k chybě (ztráta nebo přebytek dráhových pulsů).

IRC patří mezi relativní snímače polohy, protože v okamžiku po zapnutí napájení není zřejmé, v jaké poloze je hřídel snímače. Nicméně pomocí nulového pulsu je možné po zapnutí provést jakési zorientování snímače, protože poloha nulového pulsu vysílaného 1x za otáčku je přesně definována. Konkrétně u NC a CNC strojů se uvedený nedostatek projevuje tak, že po zapnutí stroje (příp. resetu systému apod.) se provádí tzv. nájezd do referenčního bodu. Od tohoto vztažného bodu definovaného určitými parametry pak probíhá odměřování. Z toho důvodu je také nutné kontrolovat správnost výstupních impulsů z čítače, protože pokud by došlo ke ztrátě nebo přebytku impulsů, poloha hlášená řídicím systémem by neodpovídala skutečné poloze. Popsané principy jsou použity jak ve starších řídicích systémech [22], tak u moderních řídicích systémů (např. Sinumerik firmy Siemens).

Použití IRC se netýká pouze průmyslových aplikací, ale lze se s nimi setkat i ve výrobcích běžné spotřební elektroniky. V současnosti se často místo potenciometrů nebo přepínačů používají rotační snímače polohy (někdy nazývané rotační kodéry, rotační enkodéry nebo inkrementální spínače), které fungují na stejném principu jako IRC používané pro měřicí a regulační účely. Jak vyplývá z obr. 7, na první pohled se rotační kodér příliš neliší od běžného potenciometru. [15]



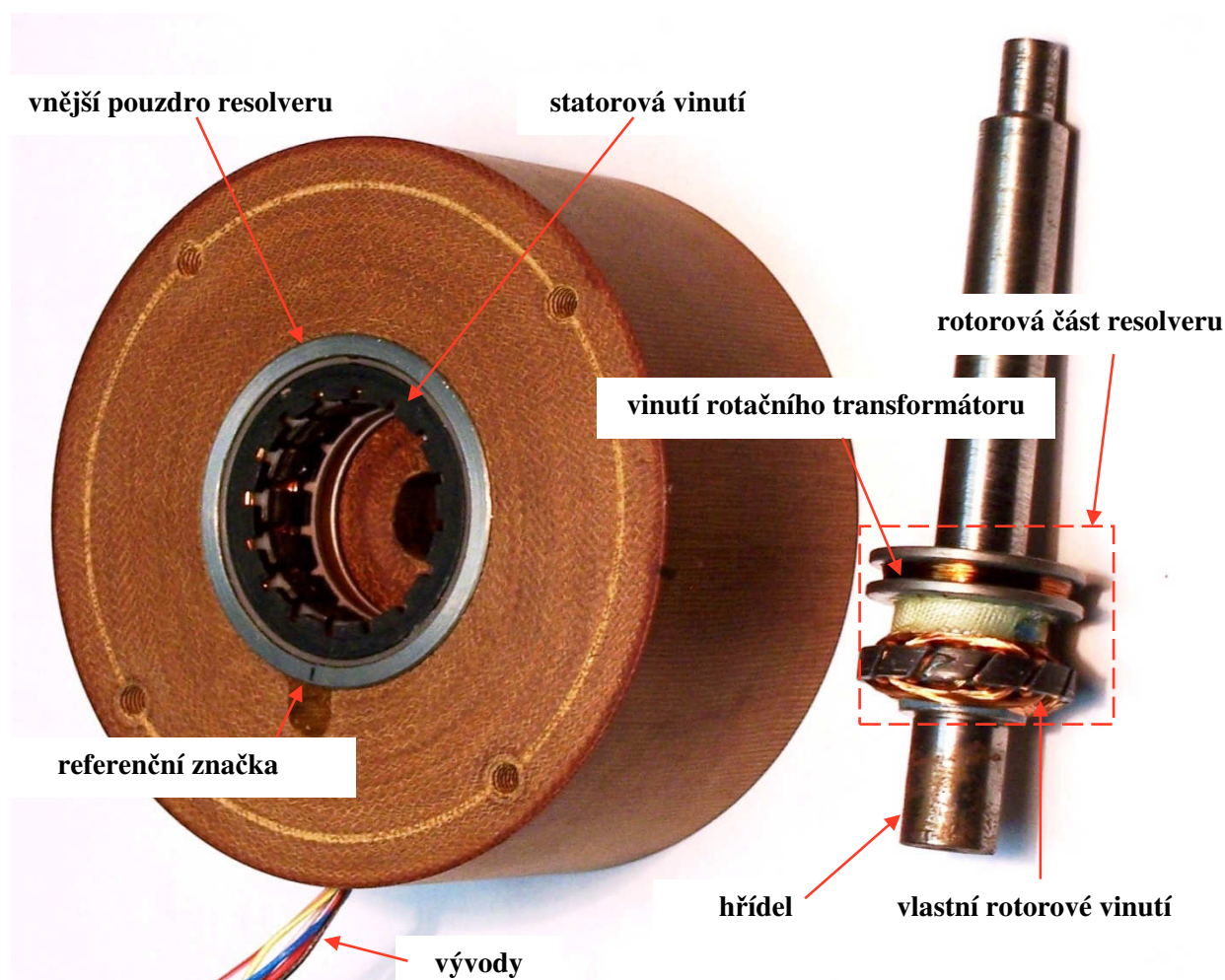
Obr. 7 Rotační kodér (celkový vzhled, vnitřní zapojení a výstupní průběhy)



### 3. Resolver

#### 3.1 Princip funkce a konstrukce snímače

Resolver patří mezi snímače polohy založené na principu elektromagnetické indukce. Snímač se skládá ze dvou statorových vinutí a rotorového vinutí. Statorová vinutí jsou vůči sobě natočena o  $90^\circ$ . Napájení rotorového vinutí může být řešeno pomocí kluzných kontaktů, nicméně častěji se používá přenos signálu do rotorového vinutí přes tzv. rotační transformátor tvořený pomocným statorovým a rotorovým vinutím. Na obr. 8 je zobrazen resolver použitý pro konstrukci laboratorního měřicího přípravku. Jedná se o bezkontaktní návlekový typ resolveru (provedení k nasunutí na hřídel, samotný resolver tvarem připomíná kuličkové ložisko).



Obr. 8 Jednotlivé díly resolveru

Resolver je na rozdíl od IRC absolutní snímač polohy, takže informace o poloze se vztahuje stále vůči jednomu referenčnímu bodu, který bývá označen na statoru i rotoru. Z toho vyplývá, že při osazování resolveru např. na hřídel motoru je třeba dbát na správné umístění referenční značky.

## 3.2 Způsoby měření

Z hlediska zapojení buzení existují 2 možné způsoby měření polohy pomocí resolveru.

### 3.2.1 Měření polohy při buzení rotorového vinutí

V tomto případě je na rotorové vinutí ( $R_1 - R_2$ ) připojeno referenční střídavé napětí konstantního kmitočtu a amplitudy. Ve statorových vinutích ( $S_1 - S_3$  a  $S_2 - S_4$ ) se pak indukují napětí související s úhlem natočení hřídele resolveru podle rovnic:

$$u_{REF} = U_{REFM} \cdot \sin(\omega t) = U_{REFM} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

$$u_{SIN} = K \cdot u_{REF} \cdot \sin(\phi)$$

$$u_{COS} = K \cdot u_{REF} \cdot \cos(\phi)$$

$u_{REF}$  [V] .....okamžitá hodnota budícího napětí (v čase  $t$ )

$U_{REFM}$  [V] ..... amplituda budícího napětí

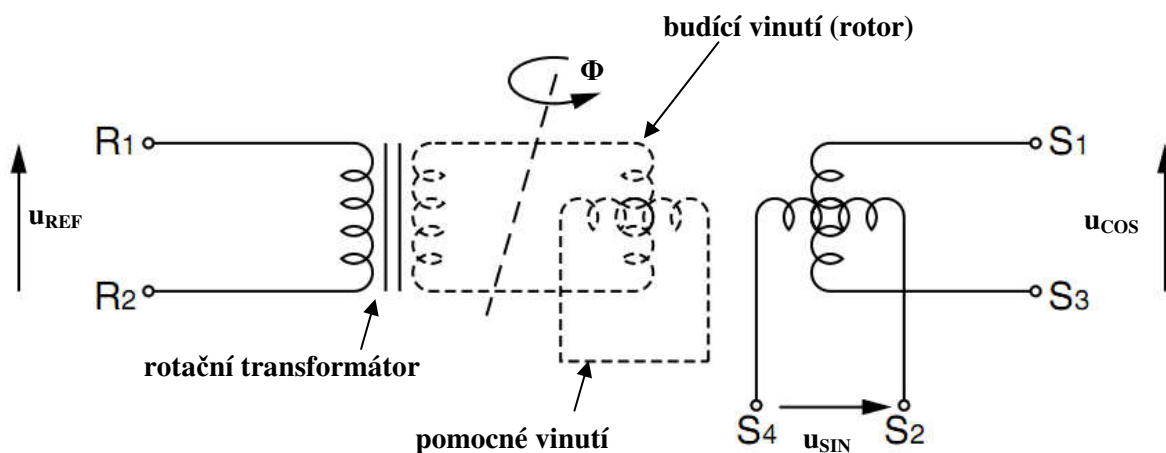
$f$  [Hz] ..... frekvence budícího napětí

$K$  ..... konstanta resolveru (daná převodem rotačního transformátoru, počty závitů vinutí...)

$\Phi$ .....úhel natočení rotoru

Podělením změřených hodnot indukovaných statorových napětí lze zjistit natočení rotoru  $\Phi$ :

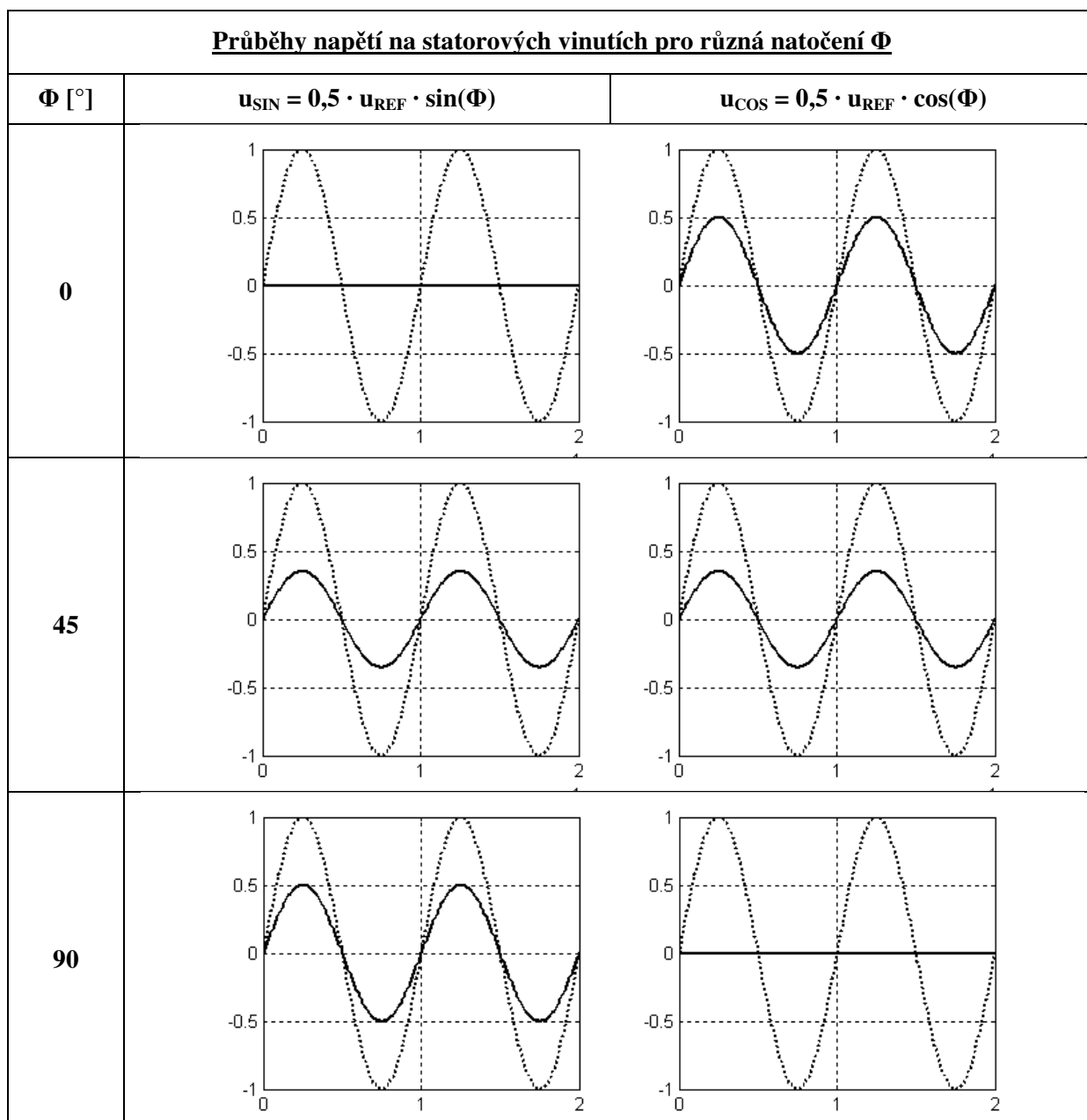
$$\frac{u_{SIN}}{u_{COS}} = \frac{K \cdot u_{REF} \cdot \sin(\phi)}{K \cdot u_{REF} \cdot \cos(\phi)} = \frac{\sin(\phi)}{\cos(\phi)} = \operatorname{tg}(\phi) \xrightarrow{\operatorname{arctg}} \phi$$

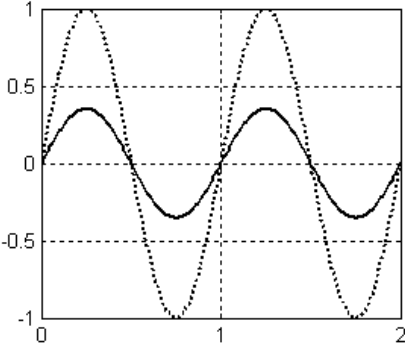
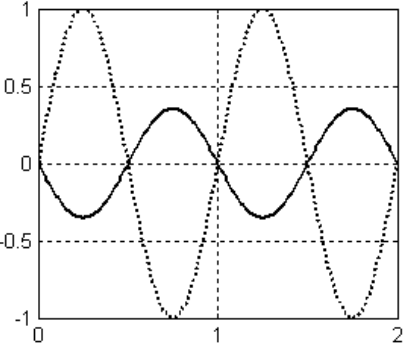
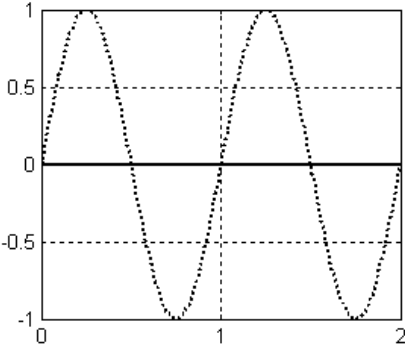
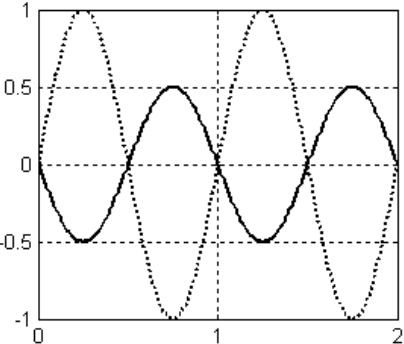
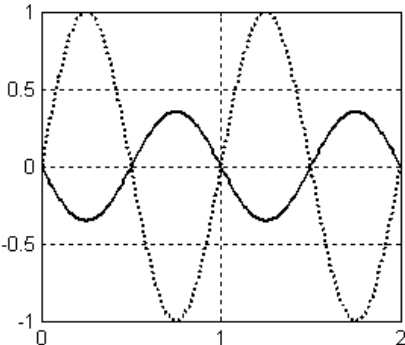
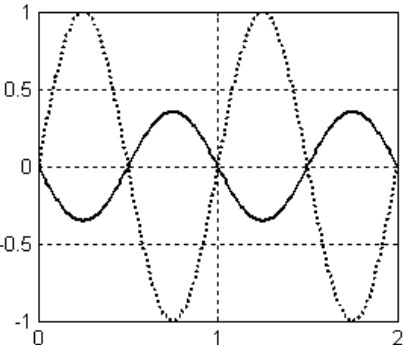
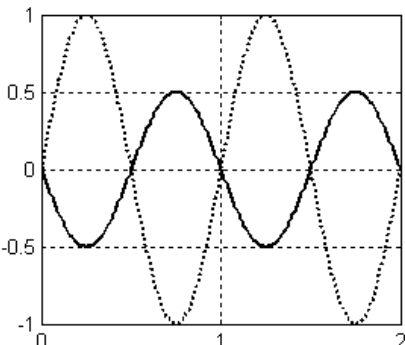
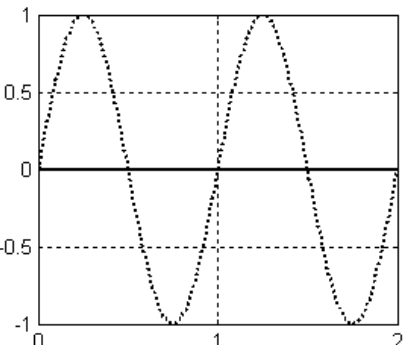


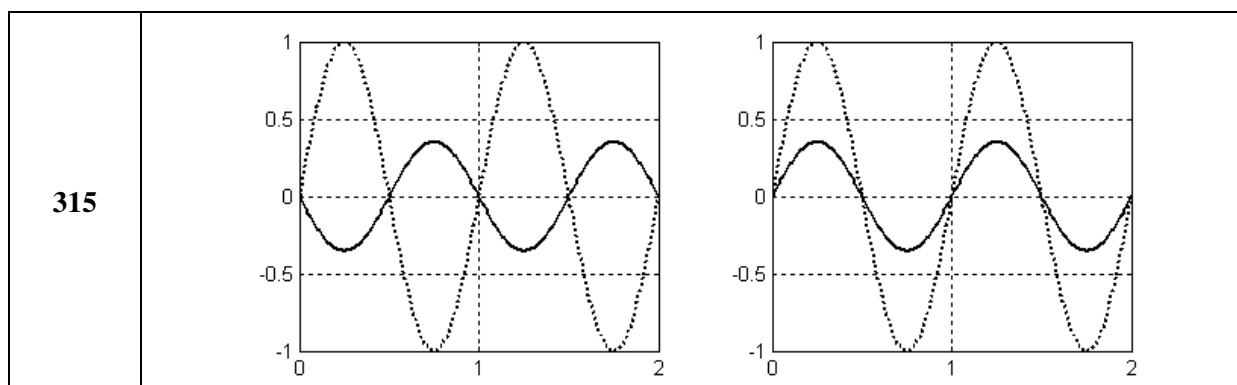
Obr. 9 Zapojení resolveru typu BRX (buzení do rotoru)

Pomocné vinutí ve schématu na obr. 9 slouží k potlačení nežádoucí příčné složky budícího elektromagnetického pole a tím i tzv. zbytkového napětí, což je napětí  $u_{\text{SIN}}$  při  $\Phi = 0^\circ$  nebo  $\Phi = 180^\circ$  (případně  $u_{\text{COS}}$  při  $\Phi = 90^\circ$  nebo  $\Phi = 270^\circ$ ), které obvykle dosahuje velikosti do 20 mV.

Z uvedených rovnic lze odvodit průběhy napětí při různých úhlech natočení. Průběhy byly vytvořeny pomocí programu Matlab, vodorovná osa udává násobky periody budícího signálu a konstanta K byla zvolena 0,5 (což hodnota odpovídající použitému typu resolveru). Tečkovaně je znázorněn budící signál.

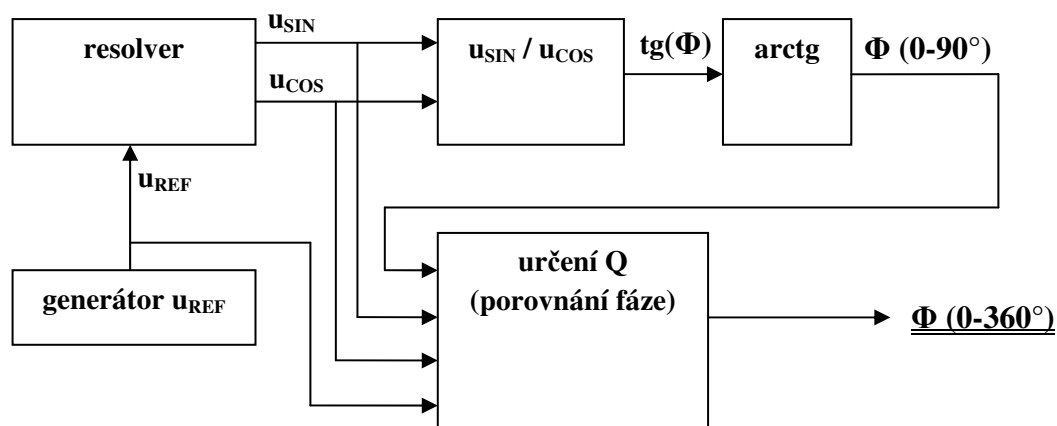


135	 
180	 
225	 
270	 



Q	$\Phi$ [°]	$u_{\text{SIN}}$ vzhledem k $u_{\text{REF}}$	$u_{\text{COS}}$ vzhledem k $u_{\text{REF}}$
1	0 až 90	ve fázi	ve fázi
2	90 až 180	ve fázi	v protifázi
3	180 až 270	v protifázi	v protifázi
4	270 až 360	v protifázi	ve fázi

S uvažováním fázových poměrů mezi budícím a výstupními signály lze při realizaci vyhodnocovacího obvodu výpočetně zjišťovat úhel pouze v rozsahu 0 až 90° a výsledek přesunout do správného kvadrantu Q podle fáze signálů. Vyhodnocovací obvod, jehož stavba je popisována v kap. 5.2, je založen právě na tomto principu a jeho blokové schéma je na obr. 10. Měření napětí z resolveru zajišťují A/D převodníky a o výpočet se stará MCU.

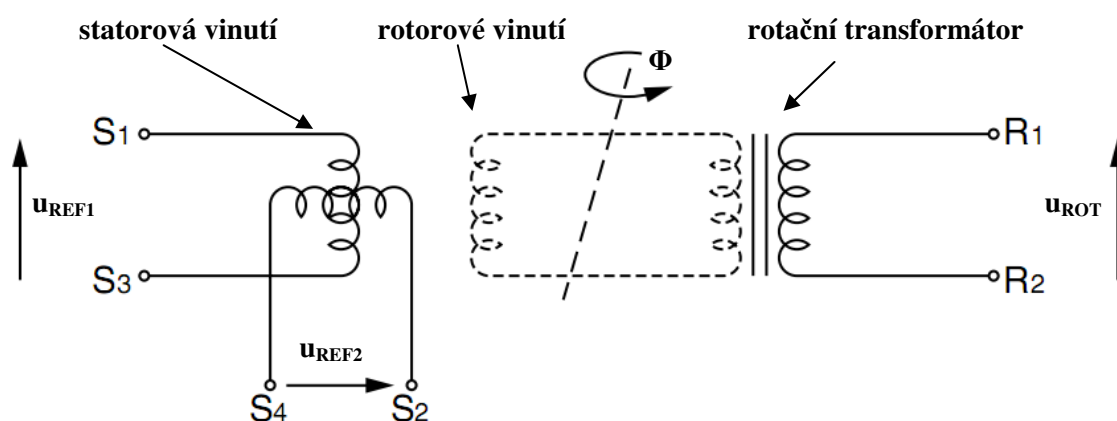


**Obr. 10** Blokové schéma obvodu pro vyhodnocení polohy resolverem při napájení rotoru

V praxi se pro vyhodnocení dat z resolveru používají speciální jednoúčelové integrované obvody, tzv. R/D převodníky, které na výstupu přímo poskytují binární informaci o poloze rotoru (běžně až 16bitovou, což odpovídá rozlišení 0,005°). Starší typy obvodů (např. AD2S82 popsany v[14]) měly paralelní výstup dat, novější typy již používají sériový přenos dat (stačí méně vývodů).

### 3.2.2 Měření polohy při buzení satorových vinutí

V tomto případě jsou obě satorová vinutí buzena harmonickým signálem, vzájemně fázově posunutým o  $90^\circ$ . Pak platí, že fáze napětí indukovaného v rotoru  $u_{ROT}$  je přímo úměrná úhlu natočení. Jak je patrné z vnitřního zapojení resolveru (obr. 11), nemůže zde být pomocné vinutí pro omezení příčné složky elmg. pole, protože díky buzení obou satorových vinutí se vytváří pole v obou směrech. Tyto typy resolverů se značí BRT.



Obr. 11 Schéma zapojení BRT resolveru

$$u_{REF1} = U_{REF} \cdot \cos(\omega t) = U_{REF} \cdot \cos(2\pi f t)$$

$$u_{REF2} = U_{REF} \cdot \sin(\omega t) = U_{REF} \cdot \sin(2\pi f t)$$

$$u_{ROT} = K \cdot u_{REF1} \cdot \cos(\phi) - K \cdot u_{REF2} \cdot \sin(\phi) = K \cdot U_{REF} \cdot \sin(\omega t - \phi)$$

$U_{REF}$  [V].....amplituda budícího signálu

$\omega$  [rad/s]..... úhlová frekvence budícího signálu

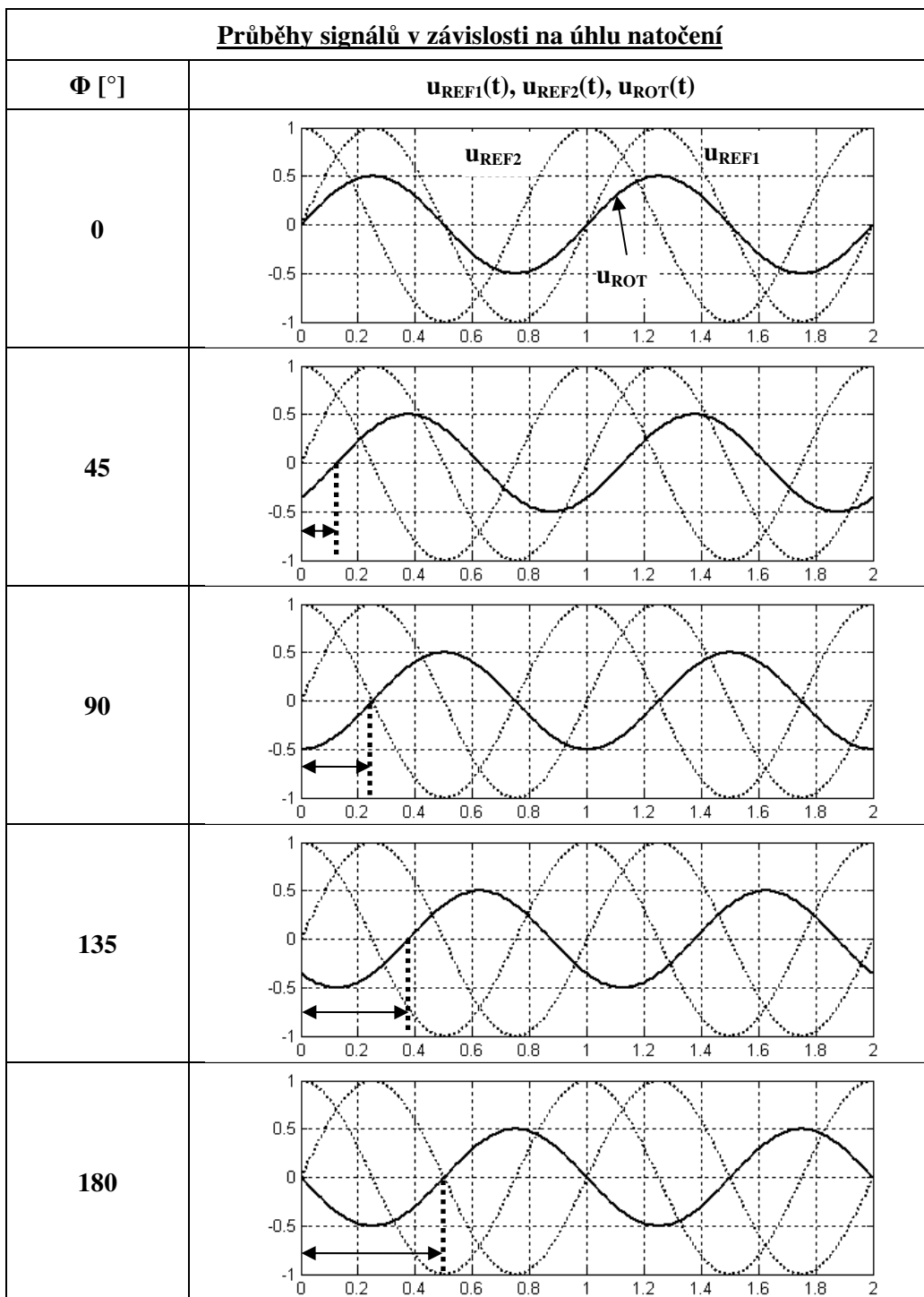
$u_{REF1}$ ,  $u_{REF2}$  [V].... budícího napětí (ok. hodnoty)

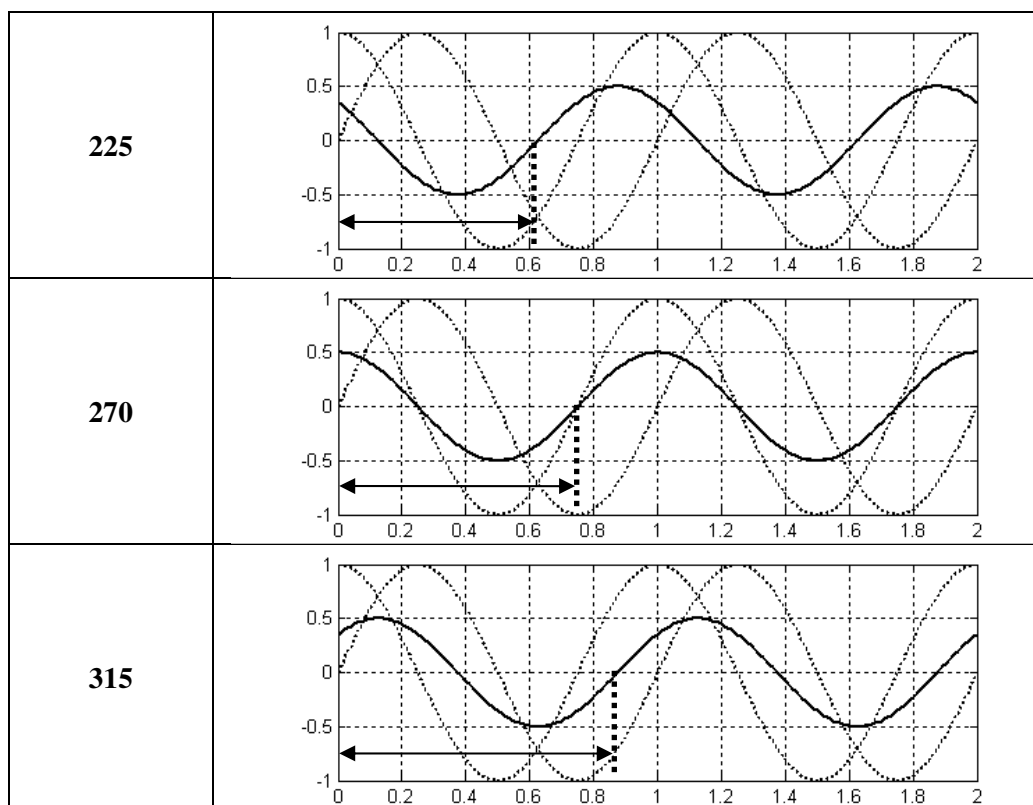
$u_{ROT}$  [V].....napětí indukované v rotoru (ok. hodnota)

$\Phi$  [rad]..... mech. úhel natočení

$K$ ..... konstanta resolveru

Na základě uvedených rovnic [9] lze opět vytvořit průběhy indukovaného napětí  $u_{ROT}$  v závislosti na úhlu natočení  $\Phi$ . Průběhy byly opět vytvořeny v programu Matlab, vodorovná osa je cejkována v násobcích periody budícího signálu  $u_{REF2}$  a konstanta  $K$  je 0,5. Z průběhů je patrné, že amplituda indukovaného napětí  $u_{ROT}$  se nemění a je rovna  $K$ , ale fázový posun mezi budícím signálem  $u_{REF2}$  (sinus) a  $u_{ROT}$  roste spolu s úhlem  $\Phi$ . Tučně je vyznačen výstupní signál  $u_{ROT}$  a čárkovane budící signály  $u_{REF1}$  (kosinus) a  $u_{REF2}$  (sinus).

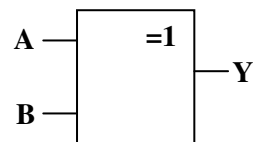




Blokové schéma vyhodnocovacího obvodu [8] je na obr. 13 a jeho činnost spočívá v převedení fázového posunu  $\alpha$  mezi dvěma signály ( $U_S \equiv u_{REF2}$ ) a  $U_R \equiv u_{ROT}$ ) na šířku pulsu a následné zpracování analogovým nebo číslicovým způsobem. O převod fáze – šířka pulsu se stará hradlo typu Ex-OR (označováno též XOR) vyžadující pro svou funkci standardní číslicový signál (TTL nebo CMOS, dle typu obvodu). Proto je třeba sinusové signály  $U_S$  a  $U_R$  vytvarovat na obdélníkové  $U_A$  a  $U_B$  pomocí komparátorů K1 a K2 porovnávajících sinus s nulovým referenčním napětím  $U_{ref}$  (k překlápění dochází při průchodu signálu nulou). Výstupem z hradla Ex-OR je signál  $U_D$ , jehož střída je přímo úměrná fázovému posunu  $\alpha$  mezi signály  $U_S$  a  $U_R$ , a tudíž i úhlu natočení  $\Phi$ . Vyfiltrováním signálu  $U_D$  pomocí dolní propusti (DPF) získáme napětí  $U_0$  představující střední hodnotu napětí  $U_D$ .  $U_0$  tedy poskytuje analogovou informaci o úhlu natočení  $\Phi$ . Vyhodnocení lze provést též číslicově pomocí čítače CT, který čítá pulsy z generátoru GEN po dobu danou trváním úrovně H signálu  $U_D$ . Nulování čítače zajišťuje řídicí obvod ŘO tak, aby vždy na počátku čítání (náběžná hrana  $U_D$  byl obsah čítače nulový).

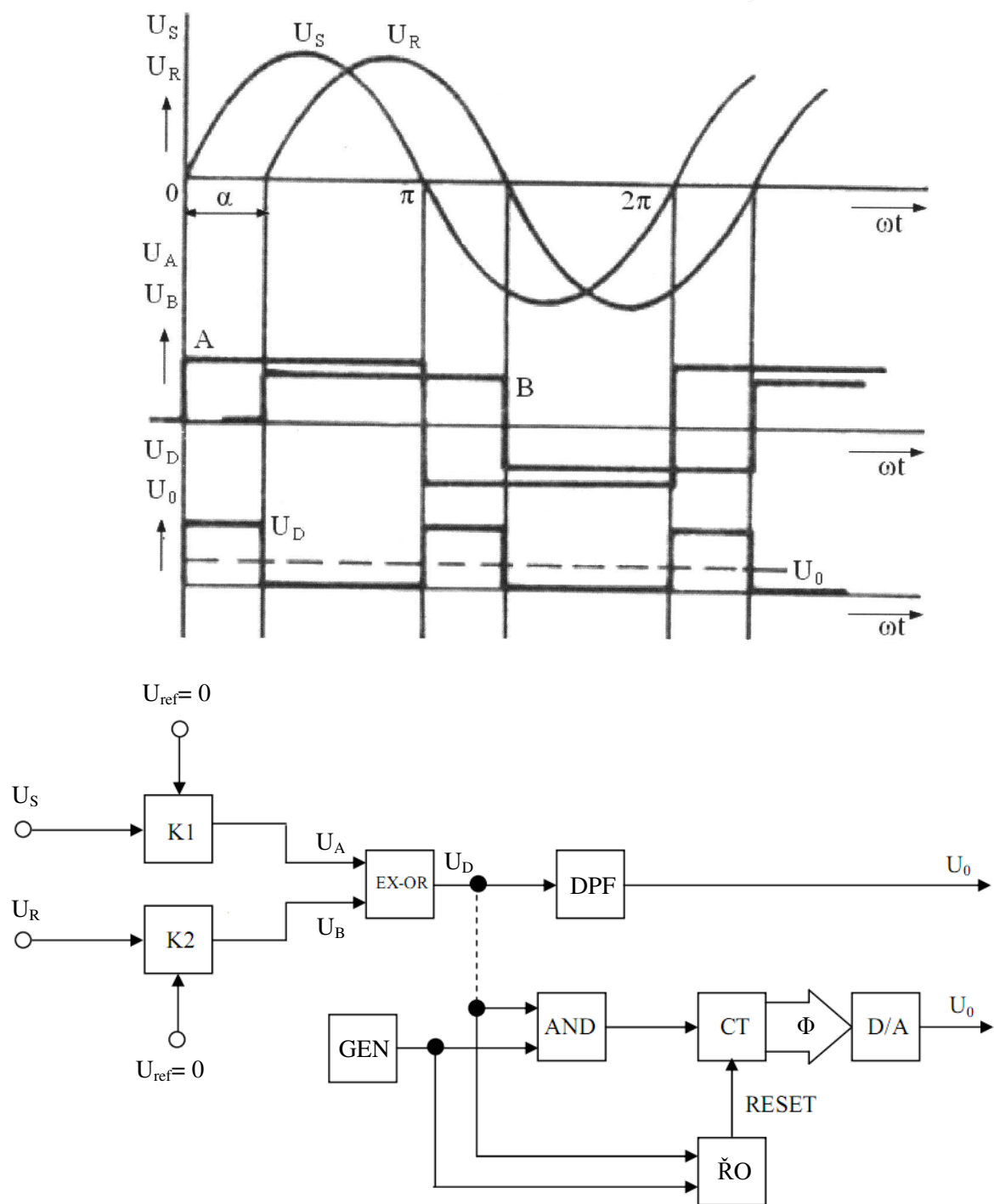
A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

$$Y = A \cdot \bar{B} + \bar{A} \cdot B$$



Obr. 12 Hradlo Exclusive-OR (Ex-OR, XOR)



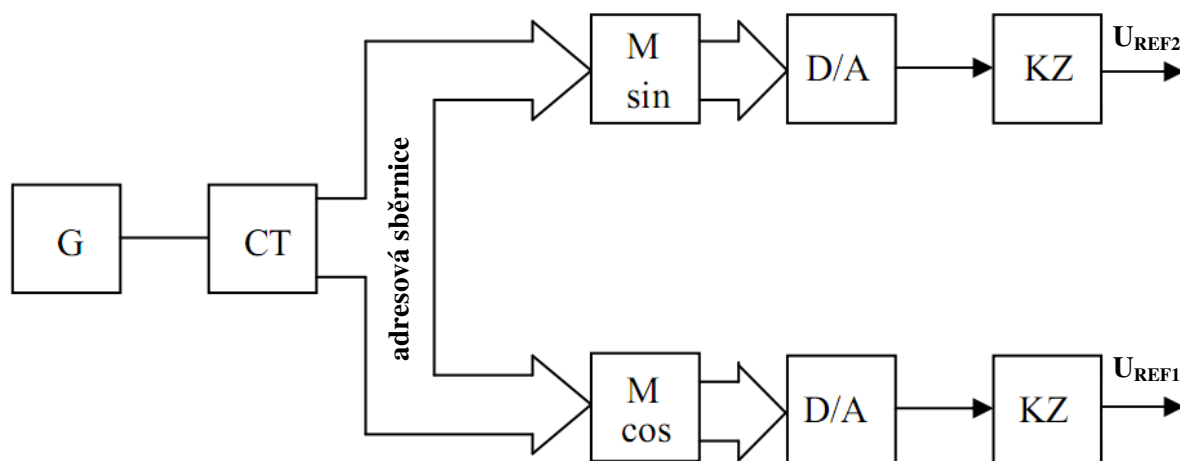


**Obr. 13** Blokové schéma obvodu vyhodnocení polohy vč. průběhů signálů

Jak vyplývá ze schématu, analogový údaj o poloze lze též získat zpětným převodem z číslicové informace pomocí D/A převodníku. Nicméně v číslicových řídicích systémech se zpětný D/A převod nepoužívá, protože už z principu není nutný.

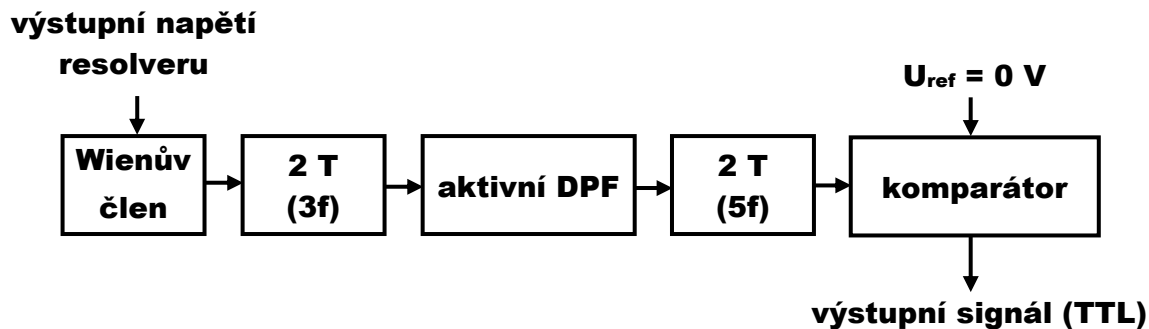
Pro zajištění přesnosti měření polohy je kromě správné konstrukce vlastního resolveru důležitý co možná nejpresnější fázový posun mezi budicími signály – ideálně  $90^\circ$ . V dnešní době lze pro vytvoření budících signálů použít metod digitální syntézy (obr. 14). Princip spočívá ve společném adresování pamětí  $M_{\sin}$  a  $M_{\cos}$ , v nichž jsou nahrány v binární formě hodnoty požadovaných průběhů (sinus a kosinus). Adresování zajišťuje čítač CT ovládaný hodinovými pulsy z generátoru G. Čtená data z pamětí jsou v A/D převodnících převedena do analogové formy (případně vyfiltrována v dolnoproustném filtru) a přes koncový stupeň KZ použita pro buzení resolveru.

Uvažujme např. požadovaný kmitočet výstupního signálu 10 kHz (tj. perioda 100  $\mu\text{s}$ ) a počet vzorků uložených v paměti 200. Tedy 1 perioda výstupního signálu je tvořena 200 vzorky, které je potřeba vyčíst za dobu 100  $\mu\text{s}$ . Kmitočet hodinových pulsů pro čítač musí být tedy 200x větší, než výstupní kmitočet, tj.  $200 \cdot 10 = 2000 \text{ kHz} = 2 \text{ MHz}$ . Čítač čítá od nuly a při dosažení 199 je nulován (adresování začíná od nuly, proto 199).



**Obr. 14 Blokové schéma generátoru budících signálů**

Další možností je napájet resolver obdélníkovým signálem, u něhož je možné snadno zajistit požadovaný fázový posun  $90^\circ$ . Na způsobu vyhodnocení se nic nezmění, výstupní rotorové napětí resolveru má schodovitý průběh o kmitočtu základní harmonické budícího signálu a příslušný fázový posun. Konkrétní blokové schéma filtru je obr. 15. Indukované napětí z resolveru prochází přes Wienův článek, dvojitý T-článek (naladěný na 3. harmonickou), dále přes aktivní dolnoproustný filtr a další dvojitý T-článek (naladěný na 5. harmonickou). Zde je již téměř sinusový signál, vedoucí na komparátor (tvarovač).



Obr. 15 Filtrace signálu resolveru při obdélníkovém napájení [20]

### 3.3 Použití resolverů v praxi

Resolvery patří vedle IRC k velmi často používaným snímačům polohy natočení hřídele nějakého mechanismu. Oproti IRC jsou poněkud odolnější, protože přímo ve snímači neobsahují žádnou elektroniku, pouze vinutí. Velmi často jsou resolvery přímo zabudovány uvnitř řízeného stroje, nejčastěji (a)synchronního motoru, bezkartáčového stejnosměrného motoru (BLDC, EC motor) nebo servomotoru. Dále jsou vyráběny resolvery jako samostatné přístroje (zakrytované, s vlastní hřídelí). Tyto typy lze použít ke snímání polohy na libovolném místě mechanismu.



Obr. 16 Vestavné („built in“) a samostatné („shaft“) typy resolverů [9]

Je běžné, že v rámci jednoho řídicího systému se používá více typů snímačů polohy, např. v oblasti obráběcích strojů (soustruhy, frézky) může být použit resolver pro snímání polohy a otáček motoru vřetena (řádově až tisíce ot/min) a pro snímání rychlosti a polohy posuvů se používá IRC (malé rychlosti otáčení, vyšší požadovaná přesnost). Vzhledem k tomu, že resolvery jsou absolutní snímače polohy (mají definován referenční bod, vůči němuž je poloha odměřována), často se používají v oblasti robotizace (pohyblivá ruka manipulátoru), kdy je potřeba hned po zapnutí nebo resetu systému znát informaci o aktuální poloze hřídele.

## 4. Další typy snímačů polohy

Kromě IRC a resolverů existují další typy polohových snímačů, které sice nejsou předmětem této práce, nicméně pro úplnost je vhodné uvést alespoň některé z nich.

### Otočný přepínač

Jedná se o nejjednodušší kontaktní absolutní snímač polohy. Pro přesná měření je jeho použití obtížné, nicméně v prvním tuzemském řídicím systému pro NC stroje z konce 60. let minulého století byla použita pětice otočných přepínačů, navzájem spojených převodem 1:10. [19]

### Potenciometr

Jedná se také o kontaktní absolutní snímač polohy. Potenciometr se skládá z odporové dráhy s vyvedenými konci, po níž se pohybuje jezdec spojený s hřídelí potenciometru. Vzniká tak odporový dělič, přičemž při lineárním průběhu odporové dráhy je výstupní napětí přímo úměrné úhlu natočení. Potenciometry se používají např. pro snímání úhlu otevření škrticí klapky u automobilových motorů s elektronicky řízeným vstřikováním (všechny současné vozy). Časté jsou také aplikace v oblasti vzduchotechniky (poloha klapky v potrubí) a vytápění (poloha páky směšovacího ventilu řízeného servopohonem).

### Rotační enkodér

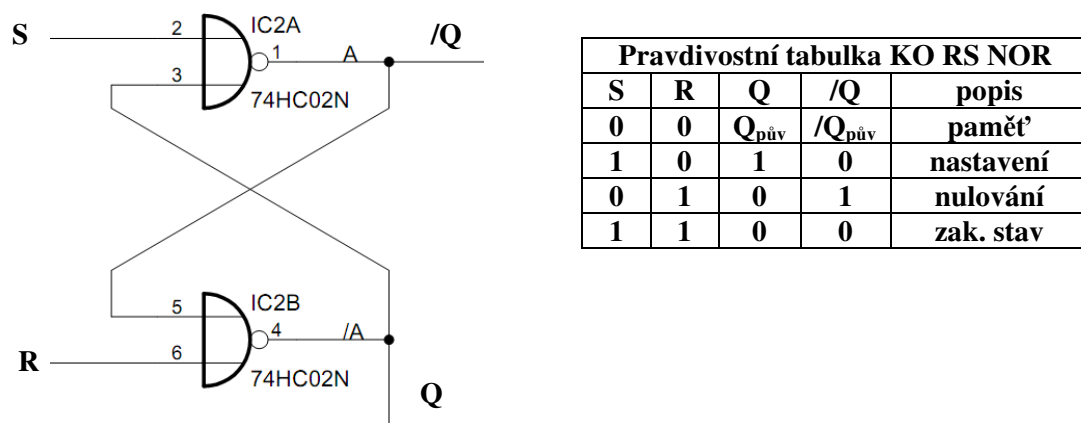
Snímače pracují na optoelektrickém principu, podobně jako IRC, nicméně na výstupu poskytují přímo informaci o absolutní poloze rotoru v n-bitové číslicové podobě. Výstupní data mohou být vysílána paralelně (všechny bity najednou, potřeba mnoho vodičů) nebo častěji sériově (po jednotlivých bitech). Výstupní data mohou být kódovány např. formou Grayova kódu, protože při obyčejném kódování (výstupní binární číslo přímo odpovídající poloze) vzniká rušení při překlápění mnoha bitů najednou (např. 1023 → 1024). Rotační enkodéry, jakožto absolutní snímače polohy, je možné použít např. v oblasti robotiky.

### Selsyn

Snímač polohy pracující na principu elektromagnetické indukce, konstrukčně podobný resolveru s tím rozdílem, že obsahuje 3 statorová vinutí rozmístěna navzájem otočená o 120°. Vyhodnocení lze provést podobně jako u resolverů. Pomocí 2 stejných selsynů (společné buzení do rotoru, statorová vinutí propojena) vznikne spojení vysílač – přijímač. Při otočení hřídele vysílacího selsynu se stejně otočí i hřídel přijímacího selsynu. Zařízení lze použít pro jednoduchou indikaci úhlu natočení, hřídel přijímacího selsynu může přímo otáčet ručičkou analogového ukazatele. Speciálním typem je tzv. lineární selsyn (rotor i stator je jednofázový), jehož výstupní napětí je v určitém rozsahu (např.  $\pm 85^\circ$ ) přímo úměrné úhlu natočení hřídele. Díky robustní konstrukci a spolehlivosti se selsyny používaly v armádní technice (poloha radaru apod.).



Signály A, B, NUL a jejich negace procházejí KO RS typu NOR, k překlopení dojde vždy při změně hlavního signálu i jeho negace.



Obr. 18 KO RS typu s hradly NOR

Náběžné a sestupné hrany spouští MKO, IC6A reaguje na náběžnou hranu signálu A, IC6B sestupnou hranu A, IC7A náběžnou hranu B a IC7B sestupnou hranu B. Na výstupu MKO je krátký impulz úrovně H, jehož délka je dána parametry RC členu připojeného k MKO (R7-R10, C1-C4). Délka impulsu je poměrně malá (cca 2  $\mu$ s), což ale pro spolehlivou činnost použitých obvodů (řady CMOS) spolehlivě dostačuje. V tomto případě, kdy se IRC otáčí pouze malými otáčkami a výstupní signál má nízký kmitočet, by mohla být délka impulsu MKO větší, nicméně dle katalogových údajů jsou maximální otáčky snímače 10 000 ot/min a v případě potřeby zpracovávat takto vysoké otáčky by se délka pulsu MKO musela ještě zmenšit.

Uvažujme snímač použitý pro konstrukci tohoto přípravku:

Max. otáčky snímače:  $n_{max} = 10000 \text{ ot/min} = 167 \text{ ot/s}$

Počet impulsů snímače:  $k_{IRC} = 1024 \text{ imp/ot}$

Po znásobení impulsů:  $k_{IRCn} = 4 \cdot k_{IRC} = 4096 \text{ imp/ot}$

Počet impulsů za 1 s při max.otáčkách (tj. kmitočet impulsů):

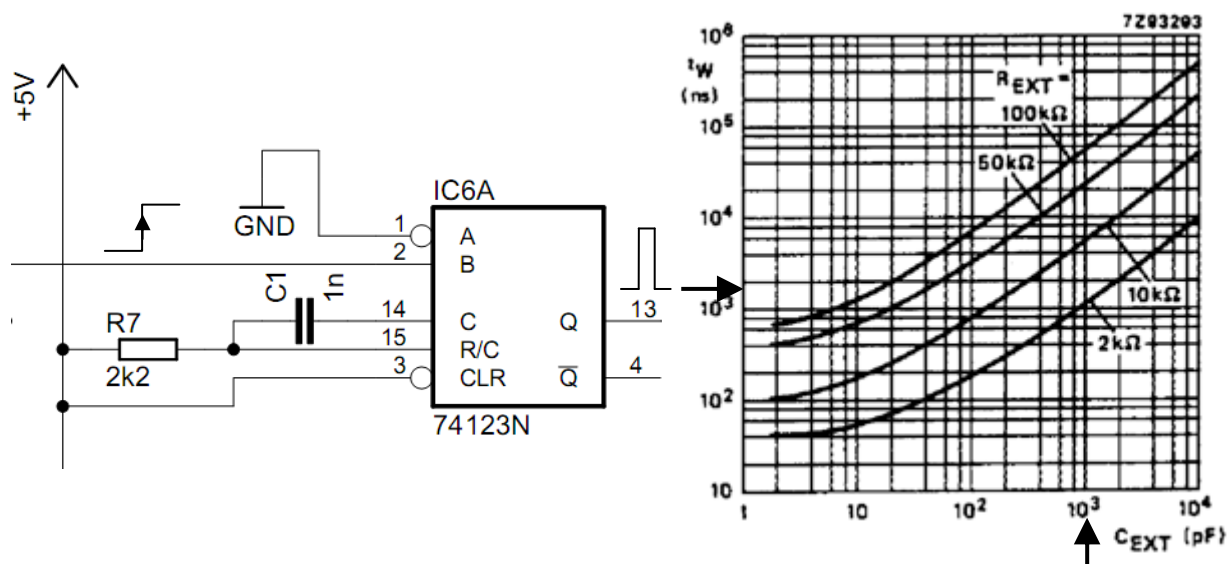
$$f_{IRCn} = k_{IRCn} \cdot n_{max} = 4096 \cdot 167 = 684032 \text{ Hz}$$

Perioda impulsů:  $T_{IRCn} = \frac{1}{f_{IRCn}} = \frac{1}{684032} = 1,46 \mu\text{s}$

Délka pulsu MKO:  $T_{MKO} < 1,46 \mu\text{s}$

V katalogovém listu MKO 74HC123 jsou definovány délky pulsů buď graficky (pro hodnoty časovacího kondenzátoru  $C_{EXT} < 10 \text{ nF}$ ) nebo pomocí vzorce pro výpočet ( $C_{EXT} > 10 \text{ nF}$ ). V listě je též definována min. doba mezi generovanými impulsy („retrigger time“). [2]

MKO má 2 vstupy, značené /A a B. Pro spouštění náběžnou hranou je signál přiveden na vstup B, vstup /A musí být v úrovni L (uzemněn). Pro spouštění sestupnou hranou je signál přiveden na vstup /A přičemž vstup B je v úrovni H (+U<sub>CC</sub>). Nulovací vstup /CLR není použit a je připojen na H.



Obr. 19 MKO 74HC123 (konkrétní zapojení a diagram pro stanovení R a C)

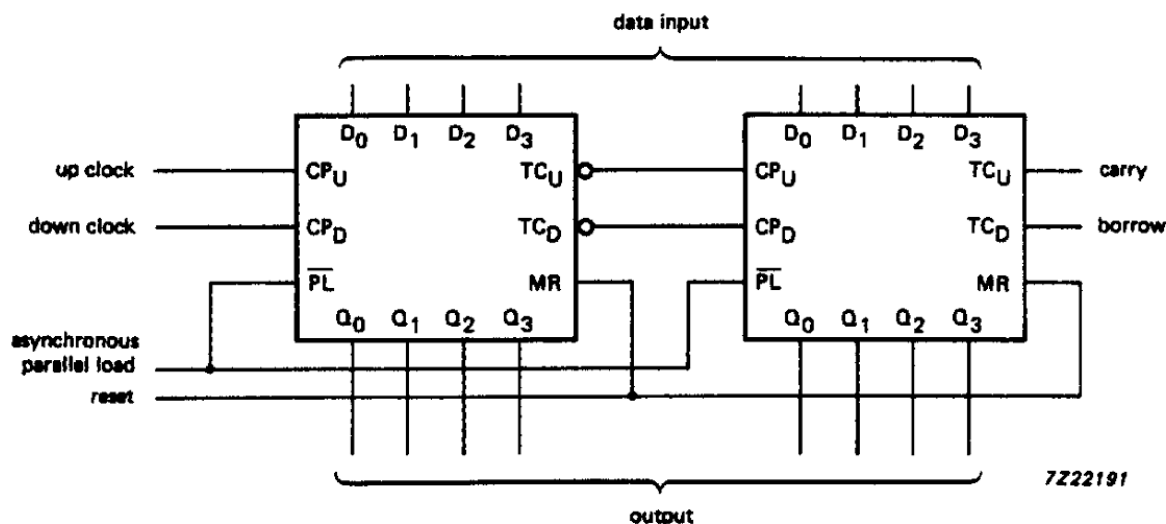
Výstupy z MKO jsou porovnávány v hradlech AND IC4 a IC5 s příslušnými signály A, /A, B, /B. Každé hradlo odpovídá jednomu řádku tab. 1 uvedené v kap. 2. 2.

Tab. 2 Přirazení hradel		
řádek	popis situace	příslušné hradlo
1	A sestupná, B = 1	IC5B
2	A = 0, B sestupná	IC5D
3	A náběžná, B = 0	IC5A
4	A = 1, B náběžná	IC5C
5	A = 1, B sestupná	IC4D
6	A sestupná, B = 0	IC4B
7	A = 0, B náběžná	IC4C
8	A náběžná, B = 1	IC4A

Výstupy hradel IC4 a IC5 jsou sloučeny a znegovány pomocí hradel OR (IC8) a NOR (IC15A, IC15B) tak, že impuls H na kterémkoliv výstupu IC4 vyvolá impuls L na výstupu IC15B a podobně impuls H na kterémkoliv výstupu IC5 vyvolá impuls L na výstupu IC15A. Impulsy z IC15A a IC15B ovládají obousměrný čítač (IC15B přičítání a IC15A odečítání).

Čítač je celkem 12bitový (tj. 0 až 4095) a vznikl spojením tří 4bitových čítačů (IC10, IC11, IC12). Použitý obvod 74HC193 je synchronní binární obousměrný čítač s předvolbou a nulováním. Kaskádní zapojení je na obr. 20. Vstupy CP<sub>U</sub> (+1) a CP<sub>D</sub> (-1) reagují na náběžnou hranu pulsu. Výstupy TC<sub>U</sub> (přetečení čítače, přenos +1 do řádu) a TC<sub>D</sub> (podtečení čítače, přenos -1 do vyššího řádu) ovládají čítač

vyššího řádu. Vstupy D0 – D3 slouží pro případné nastavení čítače na určitou hodnotu po nastavení řídicího vstupu /PL na L. Přednastavení zde není použito, takže vstupy D0 až D3 jsou nevyužity a /PL je trvale H. Nulovací vstup MR (resp. CLR) je aktivní v úrovni H, kdy dochází k vynulování čítačů. A konečně Q<sub>0</sub> až Q<sub>3</sub> (resp. QA až QD) jsou datové výstupy čítačů.



Obr. 20 Kaskádní řazení čítačů 74HC193 [3]

Výstup QA IC10 tvoří LSB a výstup QD IC12 MSB výsledného 12bitového čísla udávajícího okamžitou polohu IRC. Protože výstupem čítačů je binární číslo, jež je potřeba zobrazit na displeji, je výstupní binární číslo převedeno nejdříve do BCD kódu a následně na 7seg. displej. O převod z binárního tvaru na BCD se stará MCU ATtiny 2313. MCU je k obvodům připojen obousměrnou 8bitovou datovou sběrnici (D1 až D8). Na tuto sběrnici jsou připojeny výstupy čítačů přes 8bit neinverující střadače s třístavovými výstupy IC13 a IC14 a zároveň modul displeje.

Připojování obvodů ke sběrnici provádí MCU, přičemž význam signálů je následující:

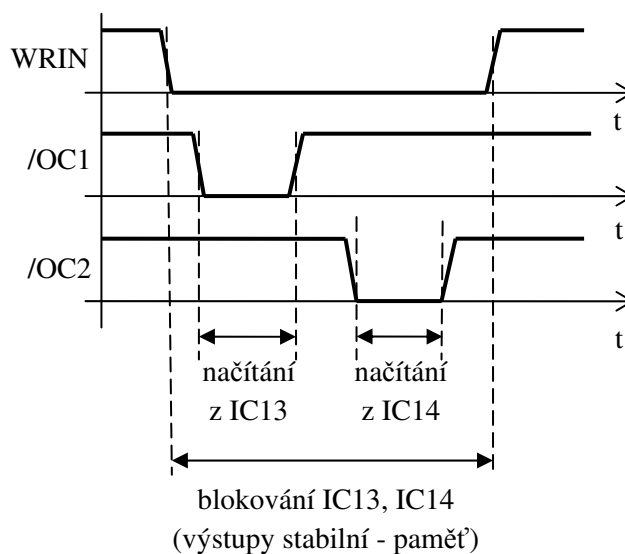
- WRIN – zápis dat do střadačů IC13, IC14 (H – přepis dat, L – paměť)
- /OC1 – připojení výstupů střadače IC13 ke sběrnici (H – odpojeno (stav Z), L – výstupy připojeny)
- /OC2 – připojení výstupů střadače IC14 ke sběrnici (H – odpojeno (stav Z), L – výstupy připojeny)
- WRL – přepis levého dvojčíslí displeje (tisíce, stovky) (H – přepis, L – paměť)
- WRP – přepis pravého dvojčíslí displeje (desítky, jednotky) (H – přepis, L – paměť)

Cyklus MCU lze rozdělit do 3 částí – načítání dat ze střadačů, převod na BCD a odeslání dat na displej.

#### 1) Načítání dat ze střadačů

Vývody MCU připojené k datové sběrnici jsou nastaveny jako vstupní. Nejdříve dochází k zablokování obou střadačů současně vysláním WRIN → L, takže v nich zůstane uložena okamžitá hodnota stavu čítačů. Poté je ke sběrnici připojen nejdříve IC13 (/OC1 → L) a obsah je načten do MCU (nižších 8 bitů čísla). Po načtení je IC13 odpojen od sběrnice (/OC1 → H) a stejným způsobem je načten obsah IC14 (/OC2 → L). Po načtení je IC14 odpojen od sběrnice (/OC2 → H) a oba střadače jsou odblokovány (WRIN → H).





**Obr. 21** Postup načítání dat ze střadačů do MCU

## 2) Převod z binárního tvaru do BCD

Funkci převodního programu lze nejlépe vysvětlit na konkrétním příkladu. Dejme tomu, že bylo načteno binární číslo 101101111110, což odpovídá desítkově číslu 2942.

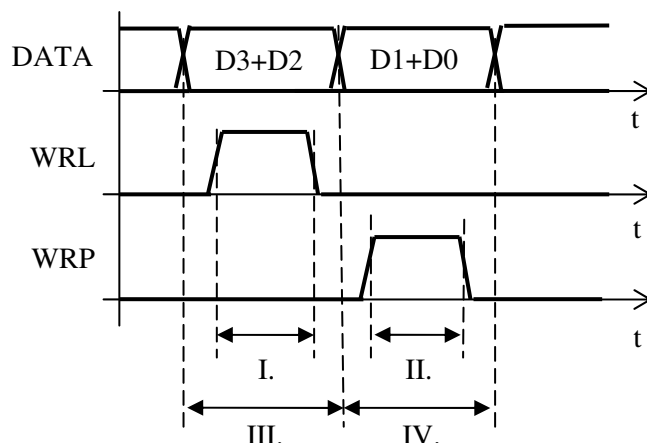
Program postupně prochází všechny bity a přičítá do proměnných D0 až D3 příslušné číslice odpovídající danému řádu.

pořadí (váha)	bit	D3 (tisíce)	D2 (stovky)	D1 (desítky)	D0 (jednotky)
1. bit (1)	0	+ 0	+ 0	+ 0	+ 0
2. bit (2)	1	+0	+0	+0	+2
3. bit (4)	1	+ 0	+ 0	+ 0	+ 4
4. bit (8)	1	+ 0	+ 0	+ 0	+ 8
5. bit (16)	1	+ 0	+ 0	+ 1	+ 6
6. bit (32)	1	+ 0	+ 0	+ 3	+ 2
7. bit (64)	1	+ 0	+ 0	+ 6	+ 4
8. bit (128)	0	+ 0	+ 0	+ 0	+ 0
9. bit (256)	1	+ 0	+ 2	+ 5	+ 6
10. bit (512)	1	+ 0	+ 5	+ 1	+ 2
11. bit (1024)	0	+ 0	+ 0	+ 0	+ 0
12. bit (2048)	1	+ 2	+ 0	+ 4	+ 8
<b>součet</b>		<b>2</b>	<b>7</b>	<b>20</b>	<b>42</b>
<b>přenos do vyššího řádu</b>					
<b>výsledek dekad.</b>		<b>2</b>	<b>9</b>	<b>4</b>	<b>2</b>
<b>výsledek BCD</b>		<b>0010</b>	<b>1001</b>	<b>0100</b>	<b>0010</b>

odesíláno na displej

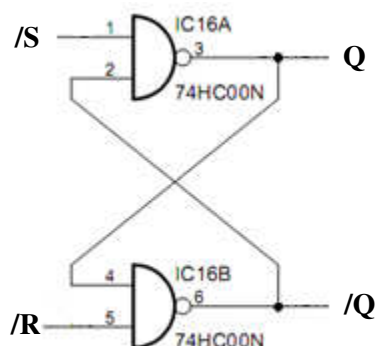
### 3) Posílání dat na displej

Vývody MCU připojení k datové sběrnici se nastaví jako výstupní. Na sběrnici se vystaví data pro levé dvojčíslí displeje (horní 4 bity odpovídají tisícům (D3), dolní 4 bity stovkám (D2)). S určitým zpožděním je odblokován vstup „horních dvou“ převodníků displeje (WRL  $\rightarrow$  1). Tím se data zapíší do vstupních pamětí modulu displeje. Vstup je opět zablokován (WRL  $\rightarrow$  0) a na sběrnici se vystaví data pro pravé dvojčíslí displeje (horní 4 bity odpovídají desítkám (D1), dolní 4 bity jednotkám (D0)). Je odblokován vstup „dolních dvou“ převodníků displeje (WRP  $\rightarrow$  1), data se zapíší do paměti modulu displeje a vstup je opět zablokován (WRP  $\rightarrow$  0).



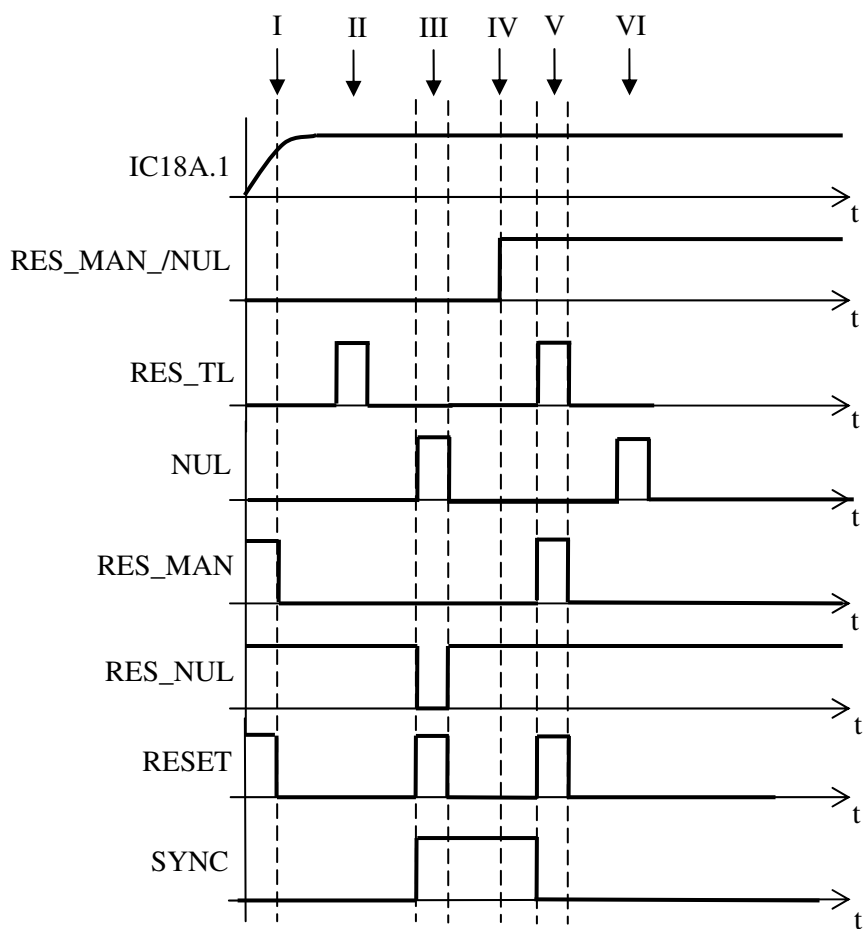
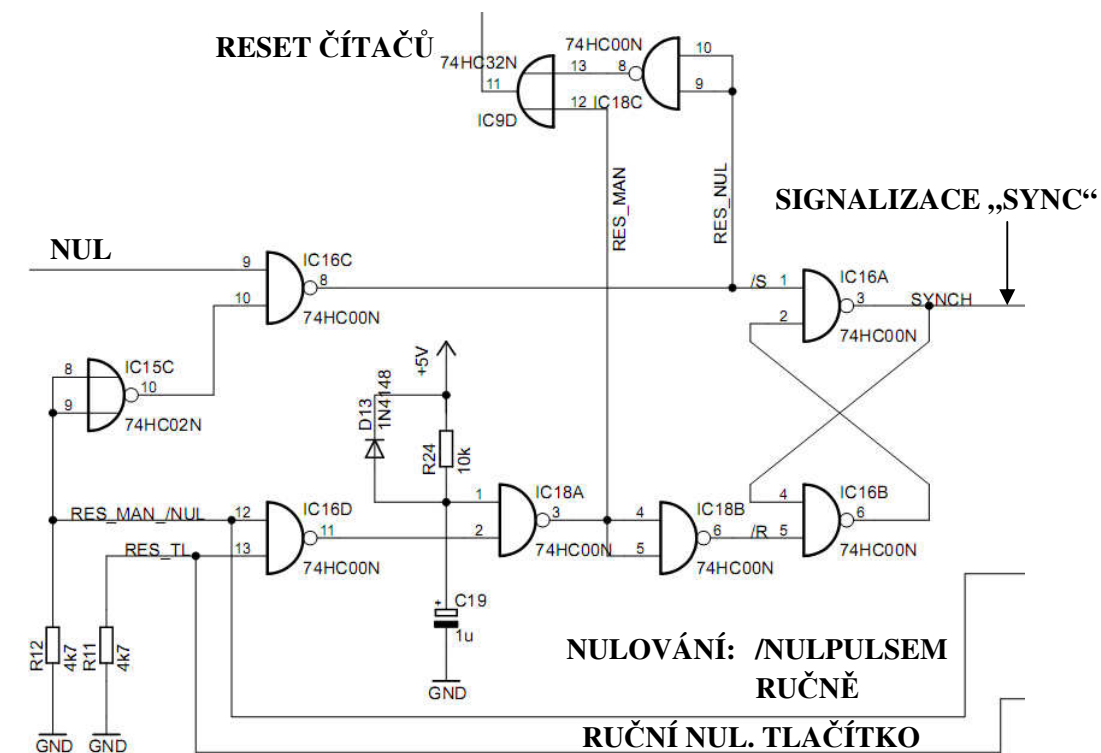
Obr. 22 Postup posílání dat na displej

Nulování čítačů řídí obvod znázorněný na obr. 24. Obvod R24 - C19 zajišťuje jednorázové vynulování po zapnutí napájení (I), časová konstanta RC členu je asi 10 ms, hodnota není kritická. V rozmezí I až IV je zvoleno nulování čítačů nulovým pulsem IRC, stisk tlačítka (II) se neprojeví. Po příchodu NUL pulsu (III) dochází k vynulování a nastavení KO RS NAND (IC16A, IC16B), jehož výstupní signál SYNC udává, že odměřování probíhá vůči referenčnímu dobu daného polohou NUL pulsu IRC. Po přepnutí do režimu ručního nulování (IV) se naopak neuplatní příchozí NUL pulsy (VI), nulování se provádí ručně tlačítkem (V). Při stisku tlačítka dochází k nulování KO RS, signál SYNC  $\rightarrow$  L, odměřování probíhá vůči nějakému bodu danému stiskem nulovacího tlačítka.



Pravdivostní tabulka KO RS NAND				
/S	/R	Q	/Q	popis
1	1	$Q_{přv}$	$/Q_{přv}$	paměť
0	1	1	0	nastavení
1	0	0	1	nulování
0	0	1	1	zak. stav

Obr. 23 KO RS typu NAND



**Obr. 24 Řídicí obvod nulování čítačů**

Výstupní signály IRC jsou vyvedeny na svorky umístěné na čelním panelu přístroje. Signály jsou odebrány za vstupními tvarovači IC1, prochází přes IC17 (neinvertující budič sběrnice), jenž má oddělovací funkci a přes ochranné odpory R13 – R19 jsou vyvedeny na výstup. Protože se předpokládá, že k výstupním svorkám bude připojen osciloskop (s běžným vstupním odporem 1MΩ), odpory nijak zásadně neovlivní výsledek měření. Maximální výstupní proud budiče 74HC244 je dle katalogového listu ± 20 mA, takže při hodnotě vložených odporů 10 kΩ by výstupy měly vydržet připojení vnějšího napětí až 200 V, což je pro laboratorní podmínky naprosto dostačující [4].

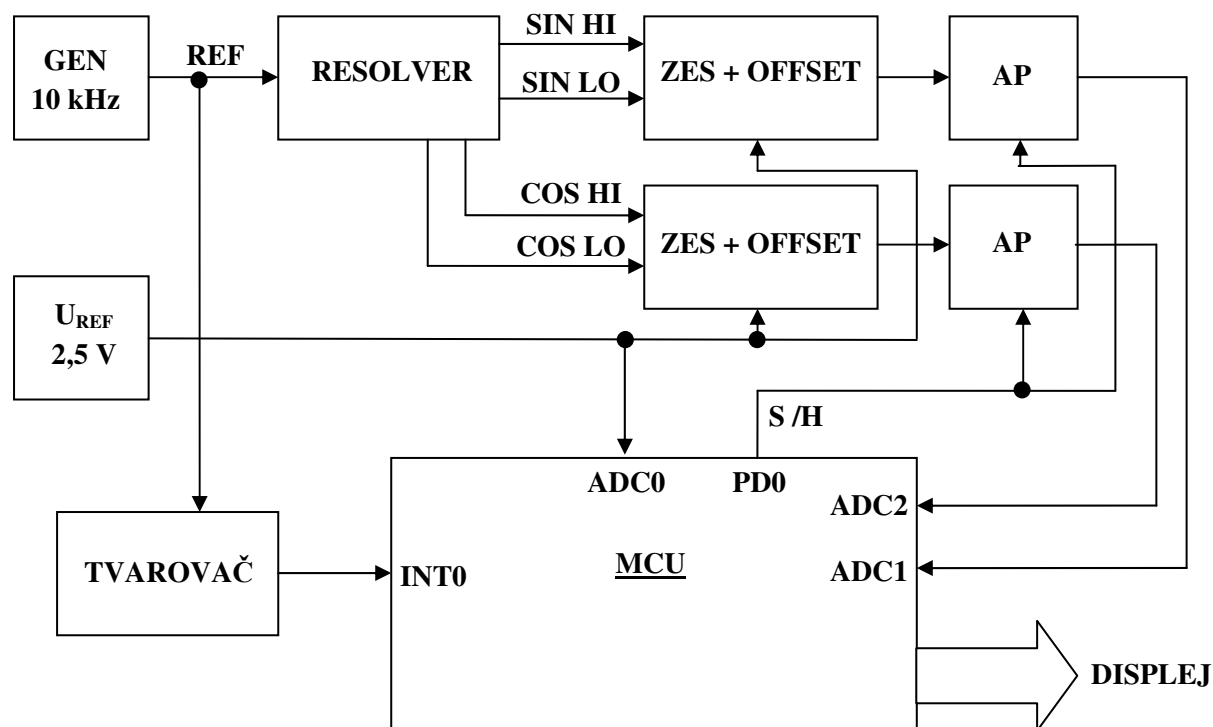
Na čelním panelu jsou též umístěny svítivé diody signalizující směr otáčení snímače. Signál pro LED je odebrán ze vstupů čítače a tyto pulsy ( $\approx \mu\text{s}$ ) jsou prodlouženy v MKO IC19 na délku asi 100 ms. Pro výpočet délky pulsu MKO lze pro vyšší hodnoty časovacího kondenzátoru použít vztah [2]:

$$t_w = 0,45 \cdot R_{\text{EXT}} \cdot C_{\text{EXT}} [\text{ns}; \text{k}\Omega; \text{pF}]$$

$$t_w = 0,45 \cdot 100 \cdot 2200000 = 99 \text{ ms}$$

## 5.2 Vyhodnocovací modul pro resolver

V přístroji byl použit bezkontaktní návlekový resolver ER5Kd286 firmy ATAS Náchod. Detailní parametry lze nalézt v [14]. Pro návrh obvodu je podstatné, že jmenovité budící napětí (ef. hodnota) je 7 V při frekvenci 10 kHz a transformační poměr je cca 0,5 ( $\pm 10\%$ ). Vyhodnocovací obvod funguje na principu uvedeném v kap. 3.2.1. (tj. buzení do rotoru). Celkové schéma bloku vyhodnocení polohy je v příloze č. 2. Zapojení se skládá ze sinusového generátoru s koncovým stupněm, zdroje referenčního napětí, vstupních rozdílových zesilovačů, vzorkovacích obvodů (analogových pamětí), tvarovače a MCU s A/D převodníkem zajišťujícího řízení ostatních obvodů, výpočet polohy a odeslání dat na displej. Blokové schéma vyhodnocovacího obvodu je na obr. 25.



Obr. 25 Blokové schéma vyhodnocovacího modulu

Generátor budicího signálu je tvořen OZ s Wienovým článkem a diodami pro stabilizaci amplitudy ve zpětné vazbě [21]. Wienův článek je tvořen součástkami R13 – C11 a R14 – C12. Trimr R17 slouží k jemnému nastavení amplitudy. Rezonanční kmitočet Wienova článku (a tím i kmitočet generátoru)

je přibližně dán vztahem: 
$$f_{osc} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

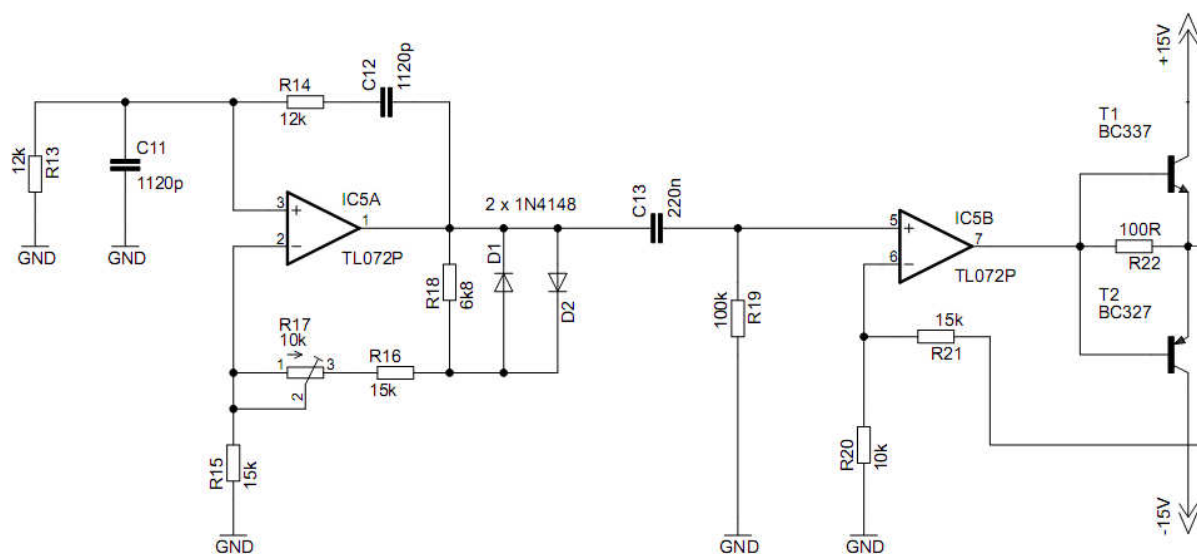
Kmitočet generátoru tedy vychází: 
$$f_{osc} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 12000 \cdot 1120 \cdot 10^{-12}} = 11,8 \text{ kHz}$$

Nicméně skutečný kmitočet generátoru je cca 9,5 kHz. OZ slouží ke kompenzaci útlumu Wienova článku (s přenosem při rezonanční frekvenci  $\frac{1}{3}$ ). Po zapnutí napájení postupně narůstá amplituda

kmitů (zesílení OZ > 3), při určité amplitudě začínají diody nelineárně omezovat amplitudu signálu a zesílení OZ se ustálí na hodnotě 3. Výstup generátoru je veden přes jednoduchou horní propust (derivační článek) C13 – R19, která odděluje případnou stejnosměrnou složku signálu. Obvod IC5B

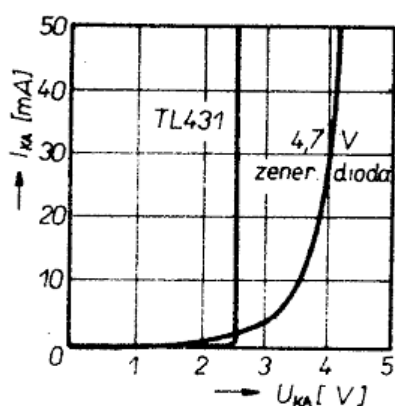
tvoří neinvertující zesilovač se zesílením  $2,5 \left(1 + \frac{R21}{R20}\right)$ , jehož výstup je posílen koncovým stupněm

T1, T2. R22 zlepšuje chování obvodu okolí nulového výstupního napětí (přivírá tranzistory). Použitý resolver vyžaduje budící napětí  $7 V_{ef}$ , což odpovídá amplitudě  $7 \cdot \sqrt{2} \approx 10 \text{ V}$ . Z toho vyplývá, že na výstupu IC5A musí být napětí s amplitudou cca 4 V (2,5x menší).

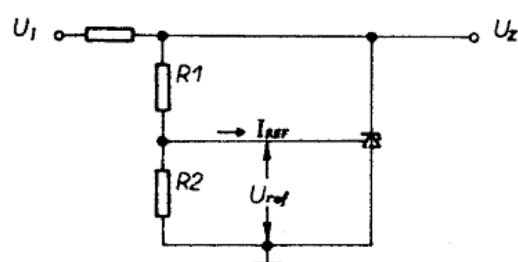
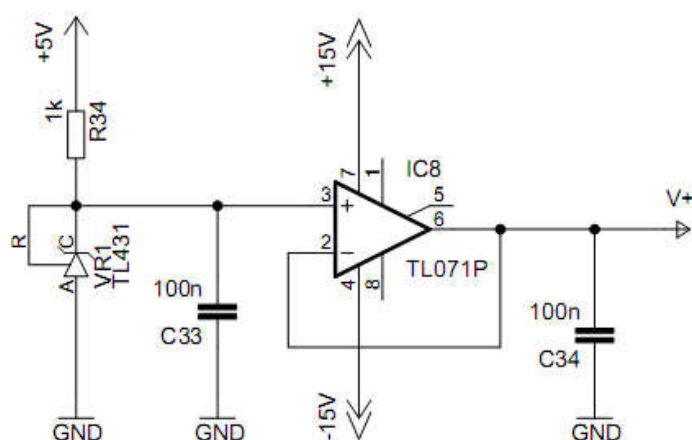


**Obr. 26 Schéma zapojení generátoru budicího signálu**

Jako zdroj referenčního napětí 2,5 V je použit integrovaný stabilizátor TL431, což je v podstatě přesná Zenerova dioda s nastavitelným napětím. Základní napětí obvodu je právě 2,5 V, vyšší napětí lze dosáhnout zapojením snímacího vývodu přes odporový dělič. Za stabilizátorem následuje zesilovač s jednotkovým zesílením (sledovač – vysoký vstupní, nízký výstupní odpor), takže vlastním stabilizátorem prochází stále stejný proud (v daném případě 2,5 mA).



	min	typ	max
Referenční napětí			
$U_{ref}$ [mV]	2440	2495	2550
Stabilita $U_{ref} \Delta U / \Delta ^\circ C$ [%]	-	0,005	-
Regulované napětí $U_{ka}$ [V]	2,5	-	36
Pracovní proud $I_k$ [mA]	1	-	100
Dynamická impedance $Z_{ka}$ [ $\Omega$ ]	-	0,2	-



$$U_x = U_{ref} \cdot \left[ 1 + \frac{R1}{R2} \right]$$

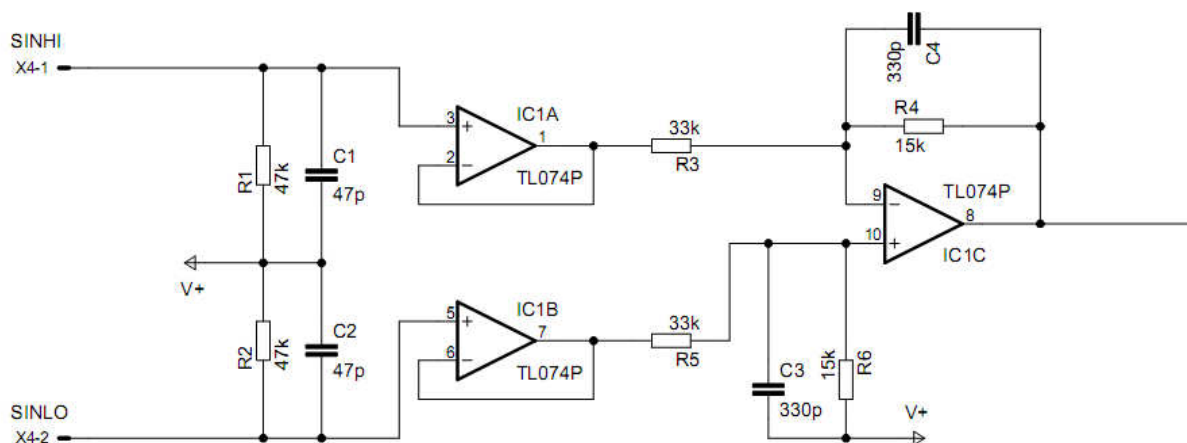
$$U_{ref} = 2,5 \text{ V}$$

Obr. 27 Zdroj referenčního napětí se stabilizátorem TL431 a základní vlastnosti obvodu [7]

Zapojení vstupního rozdílového zesilovače pochází z [18]. Obvod kromě rozdílu vstupních signálů zajišťuje snížení amplitudy signálu a stejnosměrný posun (offset) tak, aby se výstupní signál pohyboval v rozsahu 0 – 5 V, což je právě vstupní rozsah A/D převodníku vestavěného v MCU. IC1A a IC1B slouží jako sledovače (zesílení 1), IC1C pracuje jako rozdílový zesilovač, jehož zesílení je:

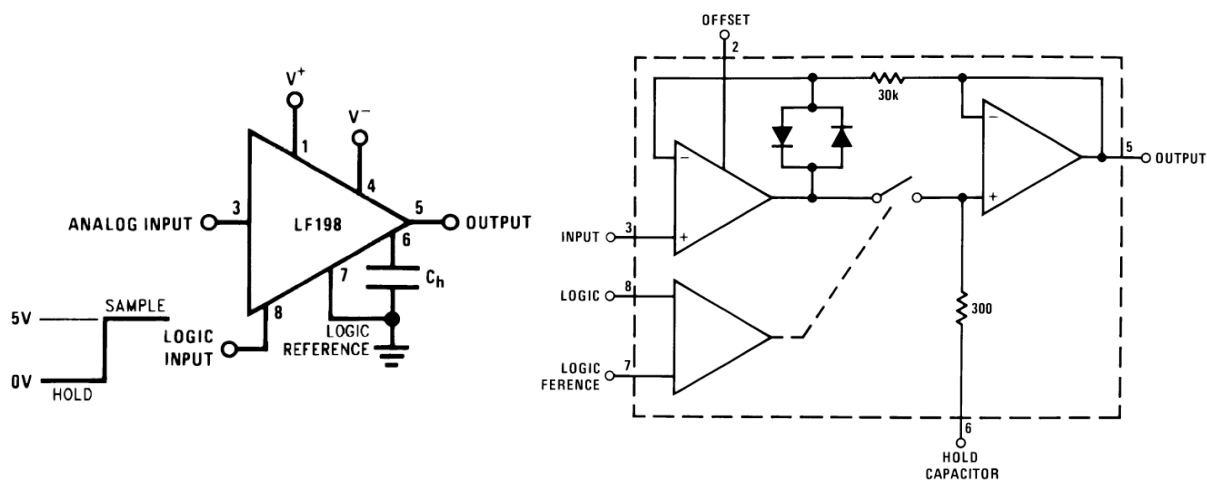
$$A = \frac{R4}{R3} = \frac{R6}{R5} = \frac{15}{33} = 0,45$$

Rovnost podílů  $R4/R3$  a  $R6/R5$  musí být zachována, jinak nedochází k potlačení souhlasné složky signálu. Referenční napětí označené V+ (2,5 V) způsobuje stejnosměrný posuv výstupního signálu a je připojeno přes R1, R2 a R6. Kondenzátory C1, C2, C3, C4 zlepšují vlastnosti zesilovače (zabraňují rozkmitání v oblasti vyšších kmitočtů).



Obr. 28 Vstupní rozdílový zesilovač

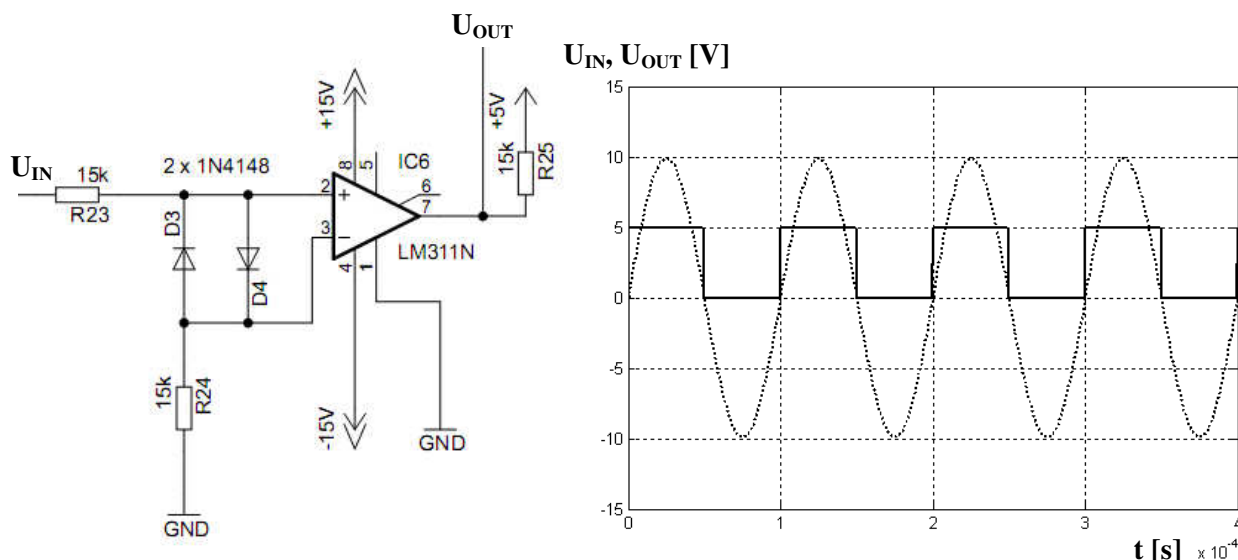
Vzorkovací obvody (analogové paměti) jsou realizovány obvody LF398 (IC3, IC4). Jejich použití je nutné, protože je potřeba převést okamžité hodnoty SIN a COS sejmuté ve stejný časový okamžik. V MCU je obsažen pouze 1 A/D převodník, nicméně s 6 přepínatelnými vstupy (na vstupu je MUX). Protože A/D převod probíhá postupně, je zapotřebí použít předřazených pamětí k uchování okamžitých hodnot signálů. Zapojení paměti vychází z katalogového listu [12], jedinou důležitou součástí pro činnost je vnější paměťový kondenzátor (C6, C12). Je vhodné použít kvalitní typy (fóliové), rozhodně ne keramické. Paměti jsou napájeny symetrickým napětím  $\pm 15$  V, řídicí vstupy /SH reagují na signál běžných logických úrovní (H – vzorkování („sample“); L – paměť („hold“)). Ustálení výstupu po zablokování paměti trvá cca 20  $\mu$ s („acquisitiontime“), proto je v programu prodleva mezi zablokováním pamětí a zahájením A/D převodu.



Obr. 29 Běžné zapojení paměti LF398 a vnitřní struktura obvodu

Tvarovač převádí sinusový budící signál na obdélníkový při průchodu nulou a je tvořen komparátorem IC6. Diody D3, D4 zapojené mezi vstupy komparátoru zlepšují dynamické vlastnosti obvodu tím, že omezují rozdílové napětí mezi svorkami na hodnotu cca  $\pm 0,65$  V. Výstup komparátoru je typu

otevřený kolektor, emitor výstupního tranzistoru je připojen na zem (svorka 1), kolektor je přes „pull-up“ odpor R31 připojen na +5 V, takže výstup je ve formě logických úrovní a lze jej přímo připojit na vstup MCU.



**Obr. 30 Schéma zapojení tvarovače a průběhy signálu**

Použitý MCU je typu ATmega 48, z důvodu vestavěného A/D převodníku má obvod dvojí napájení – pro číslicovou (vývody VCC a GND) a analogovou část obvodu (AVCC, AGND). Vývod AREF může být použit pro připojení vnější reference pro A/D převodník. Způsob připojení napájecího napětí vychází z doporučení uvedených v [5], kde je též popis jednotlivých periférií a příslušných registrů použitých při tvorbě programu (příloha č. 9).

Vyhodnocovací cyklus začíná sestupnou hranou na výstupu komparátoru IC6 (tj. při průchodu budícího signálu nulou z kladných do záporných hodnot), tím je vyvoláno vnější přerušení MCU (vstup INT1). Výstup komparátoru je uzemněn až do ukončení cyklu vysláním L z MCU. Se zpožděním asi 25  $\mu$ s (do vrcholu sinusovky, tj. čtvrtina periody signálu) dochází k zablokování vstupních analogových pamětí (/SH  $\rightarrow$  L). Následuje prodleva (cca 30  $\mu$ s) pro ustálení výstupů pamětí a poté je postupně proveden A/D převod. Na obr. 31 jsou uvedeny průběhy signálů v jednotlivých částech zapojení při úhlu natočení 75°. Význam veličin v grafech je následující:

$U_{REF}$  – budící napětí na rotoru resolveru

$U_{KOMP}$  – výstup komparátoru (v průběhu cyklu blokováno (L))

$U_{SIN}$  – výstupní napětí resolveru SIN (neupravené)

$U_{SINVZ}$  – upravený a vzorkovaný signál SIN (přerušovaně naznačen nevzork. signál a offset)

$U_{COS}$  – výstupní napětí resolveru COS (neupravené)

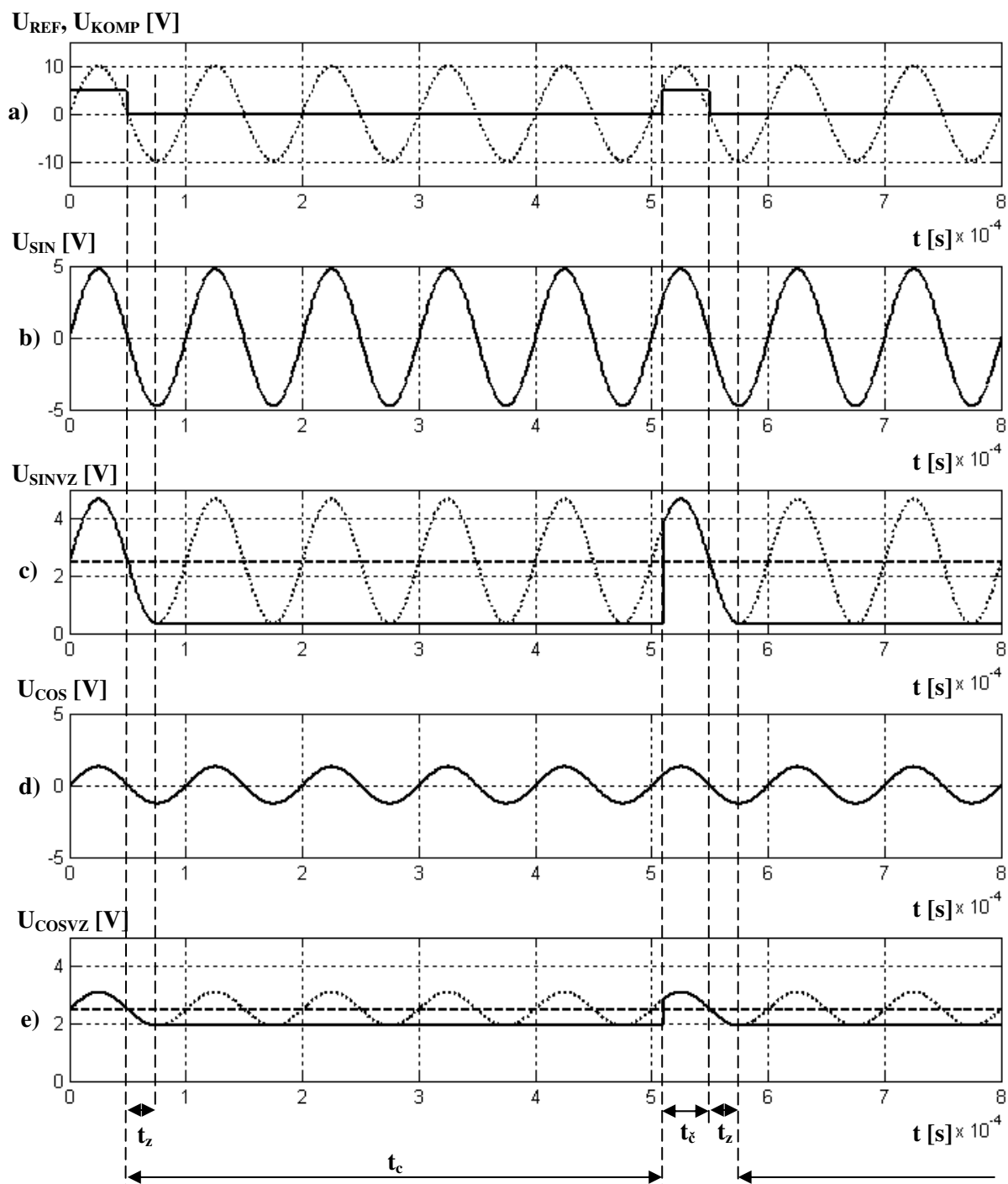
$U_{COSVZ}$  – upravený a vzorkovaný signál COS (přerušovaně naznačen nevzork. signál a offset)

$t_z$  – zpoždění do vrcholu sinusovky (cca 25  $\mu$ s)



$t_c$  – celková doba cyklu (orientační hodnota)

$t_\xi$  – čekací doba od ukončení cyklu do začátku dalšího cyklu



Obr. 31 Průběhy signálu v jednotlivých částech zapojení

**Výpočet úhlu natočení  $\Phi$**  probíhá podle blokového schématu uvedeného v kap. 3.2.1 (obr. 10).

#### Výpočet podílu $U_{\text{SIN}}$ a $U_{\text{COS}}$

Jelikož MCU díky své architektuře pracuje pouze s 8bitovými celými čísly, nelze pro výpočet použít obyčejnou operaci dělení. Nicméně lze použít výpočetní algoritmus založený na jednoduchém principu, kdy se do nějaké proměnné v každém cyklu přičítá hodnota dělitele tak dlouho, dokud se obsah této proměnné nerovná dělenci. Počet cyklů pak odpovídá podílu.

Pro jednoduchost uvažujme např. podíl čísel 30 a 6 (K číslo cyklu, P je pomocná proměnná):

- 1) K = 1, P = 6 ..... P < 30, další krok
- 2) K = 2, P = 12 (původní P + 6) ..... P < 30, další krok
- 3) K = 3, P = 18 ..... P < 30, další krok
- 4) K = 4, P = 24 ..... P < 30, další krok
- 5) K = 5, P = 30 ..... P = 30 a platí, že  $30/6 = 5 = K$

Stejný postup je použit v programu (procedura „Podíl“), jen s tím rozdílem, že výsledek dělení je ve dvou 8bitových proměnných (PodD a PodH). Vstupní čísla jsou v proměnných SinD a CosD, pomocné proměnné PomD a PomH. V PodH je uložena celá část, v PodD desetinná část výsledného podílu.

		PodH								PodD							
	n	7	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8
váha	$2^n$	128	64	32	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,0625	0,03125	0,015625	0,0078125	0,00390625

Hodnota podílu udává tangens úhlu natočení  $\Phi$ , přičemž max. hodnota (PodH = 255 a PodD = 255) odpovídá  $\text{tg}(\Phi) = \infty$  (tj.  $\Phi = 90^\circ$ ). Z průběhu funkce tangens vyplývá, že v intervalu 0 až  $45^\circ$  (bude PodH nulový, protože  $\text{tg}(\Phi) < 1$ ).

#### Zjištění úhlu

Z matematického hlediska je nutné pro určení velikosti úhlu použít inverzní funkci, tj.  $\text{arctg}(\text{tg}(\Phi))$ . Program tedy musí každému 16bitovému číslu z proměnných PodH a PodD přiřadit odpovídající hodnotu úhlu podle funkce  $\text{arctg}(x)$ . V daném případě byl použit jednodušší postup. Pro každý výsledný úhel z intervalu 0 až  $90^\circ$  bylo vypočteno příslušné rozpětí hodnot PodD a PodH a program v MCU tedy pouze přiděluje danému číslu výsledný úhel. Tento převod vykonává procedura označená „ArcTG“.

Výslednou hodnotu z intervalu 0 až  $90^\circ$  je nyní potřeba posunout do správného kvadrantu tak, aby na displeji byl indikován úhel natočení  $\Phi$  v celém rozsahu (tj. 0 až  $359^\circ$ ). K tomu v programu slouží proměnné SinPol a CosPol, které udávají, zda vstupní signály SIN a COS použité pro výpočet byly ve fázi nebo v protifázi vůči budícímu napětí. Stanovení kvadrantu je popsáno v kap. 3.2.1.

### Odeslání dat na displej

Způsob převodu binárního čísla na BCD kód a odeslání dat do jednotky displeje je stejný jako u vyhodnocovacího bloku IRC a je popsán v kap. 5.1.

Signály resolveru jsou vyvedeny na svorky umístěné na čelním panelu přístroje, takže jsou měřitelné osciloskopem. Budící napětí (REF) je vedeno z výstupu generátoru, signály SIN a COS jsou odebírány z výstupů rozdílových zesilovačů přes sledovače IC1D a IC2D. Výstupy jsou chráněny odpory R9, R18 a R32 proti zkratu a případnému připojení malého napětí zvenčí. Při použití běžného osciloskopu odpory nijak zásadně neovlivní přesnost měření.

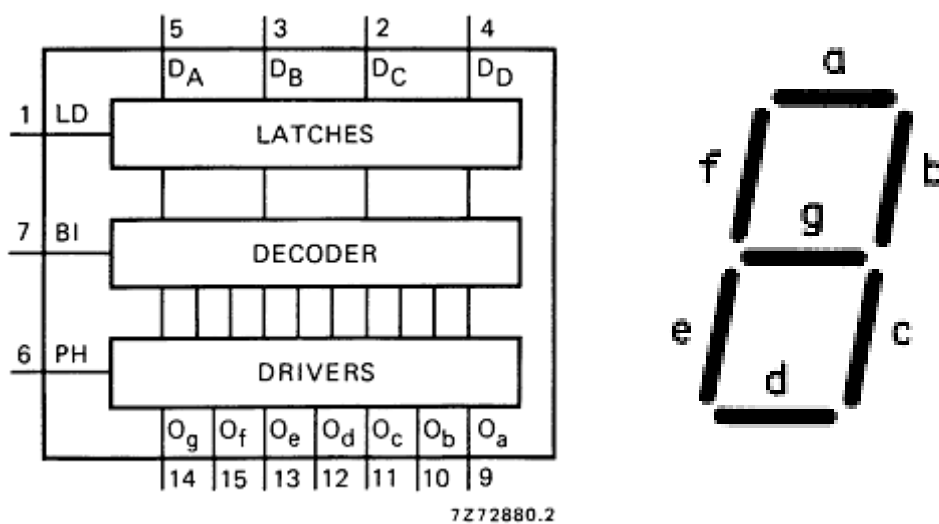
## 5.3 Jednotka displeje

Jednotka displeje slouží k zobrazení dat získaných z vyhodnocovacích obvodů IRC a resolveru. Skládá se z 4místného displeje, 4 převodníků BCD/7seg a příslušných předřadných odporů. Zapojení jednotky je společné pro IRC i resolver a je uvedeno v příloze č. 3. Jako převodníky jsou použity IO typu 4543, které mají vestavěn vstupní střadač umožňující uchování dat přímo v obvodu. Vstupy převodníků IA, IB, IC a ID jsou připojeny k datové sběrnici tak, že jsou propojeny vstupy obvodů IC1-IC3 a IC2-IC4. Přepis střadačů probíhá postupně (IC1-IC2 a IC3-IC4), způsob posílání dat na displej je popsán v kap. 5.1. Segmenty displeje jsou připojeny k výstupům převodníků A až G přes předřadné odpory určující proud, a tudíž i svítivost displeje. Úbytek napětí na segmentu displeje je asi 2 V, takže při použití odporu 390  $\Omega$  je proud do displeje asi 7,7 mA. Max. výstupní proud převodníků je 10 mA. Význam ovládacích vývodů převodníků 4543 je následující:

/LE – ovládání vstupních střadačů (L – paměť, H – přepis dat)

PH – nastavení výstupů podle použitého displeje (L – společná katoda, H – společná anoda)

BL – umožňuje zhasnutí displeje (L – svítí, H – nesvítí)



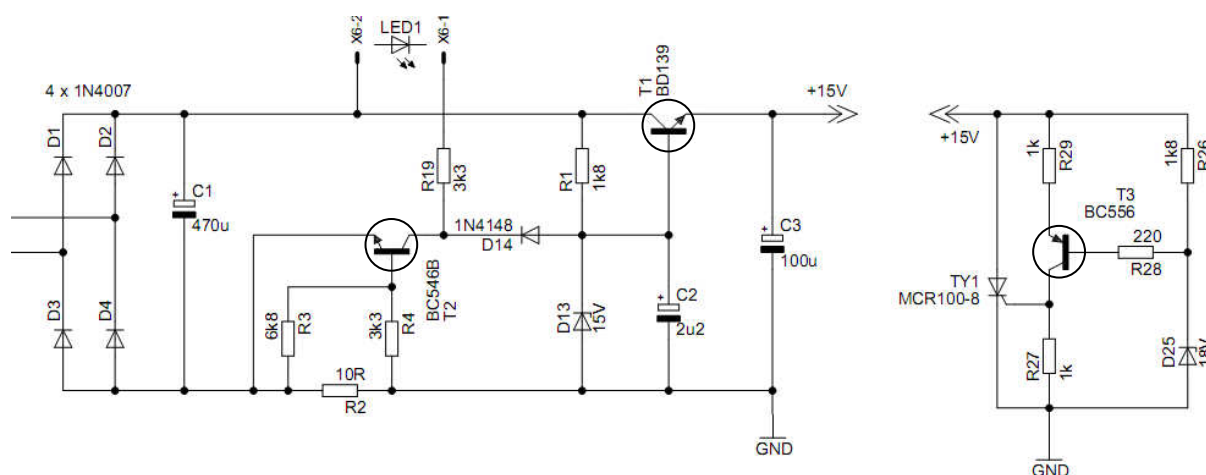
Obr. 32 Blokové schéma převodníku 4543 a označení segmentů displeje [1]

## 5.4 Napájecí zdroj a regulátor motorku

Schéma zapojení je uvedeno v příloze č. 4. Zdroj poskytuje napětí 5 V/1 A a  $\pm 15\text{V} / 100\text{ mA}$  a všechny výstupy jsou jištěny proti přepětí i nadproudu (přetížení je signalizováno indikačními LED diodami na čelním panelu). Síťové napětí je na desku zdroje (konektor X7) přivedeno přes síťový vypínač a pojistku (T160mA) na čelním panelu.

Zdroj  $\pm 15\text{ V}$

Napájení zajišťuje transformátor TR1 (230/2x15V/3VA). Malé transformátorky do DPS mají obvykle vysoké napětí naprázdno a poměrně malý zkratový proud (měkká charakteristika). Použitý transformátor má napětí naprázdno 2x27 V a zkratový proud asi 300 mA při zkratu jednoho sekundáru, resp. 200 mA při zkratu obou sek. vinutí. Sekundární vinutí trafa je jistěno tavnými pojistkami (F160mA). Na obr. 33 je zapojení jednoho kanálu zdroje, druhý kanál je zapojen shodně. Střídavé napětí je usměrněno můstkovým usměrňovačem D1-D4 a filtrováno kondenzátorem C1. Zdroj využívá klasického zapojení se Zenerovou diodou a tranzistorem. Na odporu R2 vzniká úbytek napětí přímo úměrný protékajícímu proudu (1 V/100 mA). R3-R4 slouží jako dělič napětí. Dosáhne-li napětí na R3 úrovně cca 0,65 V, otevírá se tranzistor T2, který způsobí přizemnění báze výstupního tranzistoru a tím snížení výstupního napětí (resp. proudu). Překročení proudu je signalizováno svitem LED1. Dioda D14 slouží k oddělení obvodu nadproudové ochrany (jinak by mohla signalizační LED svítit i za běžného provozu v důsledku úbytku napětí na R1). Obvod tyristorem TY1 tvoří přepětíovou ochranu. Při nárůstu výstupního napětí (z důvodu poruchy zdroje) nad cca 18 V začíná protékat proud Zenerovou diodou D25 a začíná vznikat úbytek napětí na R26. Při úbytku asi 0,65 V se otevře T3 a přes R29 sepne tyristor, který prakticky zkratuje výstup zdroje (buď zareaguje elektronická nadproudová ochrana, nebo se po určité době spálí pojistka F1). Výstupní tranzistor T1 je typu BD139 (80 V/1,5 A) a vzhledem k nízkému zatížení nemusí být opatřen chladičem.



**Obr. 33 Zapojení jednoho kanálu zdroje  $\pm 15$  V**

### Zdroj +5 V

Zapojení je podobné jako u zdroje  $\pm 15$  V, zdroj je napájen z transformátoru TR2 přes pojistku F3. Použitý transformátor má jmenovité výstupní napětí 9 V, max. proud 1,1 A a změřené napětí naprázdno 11 V. Zdroj je vybaven nadproudovou a tyristorovou přepětíovou ochranou [16]. Místo Zenerovy diody je pro stabilizaci použita integrovaná napěťová reference TL431 (obr. 27), která mezi vývody A a R udržuje stálé napětí 2,5 V. Napětí je proto odebíráno z výstupu přes odporový dělič 1:1 (R13-R14), takže výstupní napětí 5 V je velmi přesné. Kondenzátor C8 zabraňuje rozkmitání obvodu stabilizátoru (při zapojené zpětné vazbě do vývodu R se prakticky neuplatní). Proudová pojistka je tvořena stejným způsobem, velikost proudového omezení závisí na hodnotách R10, R11, R12. Na R10 vzniká max. výkonová ztráta cca 0,7 W, proto je použito paralelní řazení více odporů. R11 není zapojen, hodnota proudového omezení je tedy dána pouze odporem bočníku R10:

$$I_{\text{MAX}} = \frac{U_{\text{BE(T8)}}}{R_{10}} = \frac{0,65}{0,73} = 0,9 \text{ A}$$

Jako výstupní tranzistor je použit typ KD649T (Darlington NPN,  $U_{\text{CEO}} 100$  V,  $I_{\text{C}} 8$  A,  $h_{21\text{E}} > 750$ ). Tranzistor je v pouzdru TO-3 a je umístěn na chladiči. Potřebnou velikost chladiče lze určit výpočtem.

tepelný odpor tranzistoru (přechod – pouzdro)..... $R_{\text{THj-c}} = 2$  K/W

tepelný odpor rozhraní pouzdro – chladič (neiz. s vazelínou)..... $R_{\text{THc-h}} = 0,2$  K/W

tepelný odpor rozhraní chladič – okolí..... $R_{\text{THh-a}} = 6$  K/W

Celkový tepelný odpor:  $R_{\text{TH}} = R_{\text{THj-c}} + R_{\text{THc-h}} + R_{\text{THh-a}} = 2 + 0,2 + 6 = 8,2$  K/W

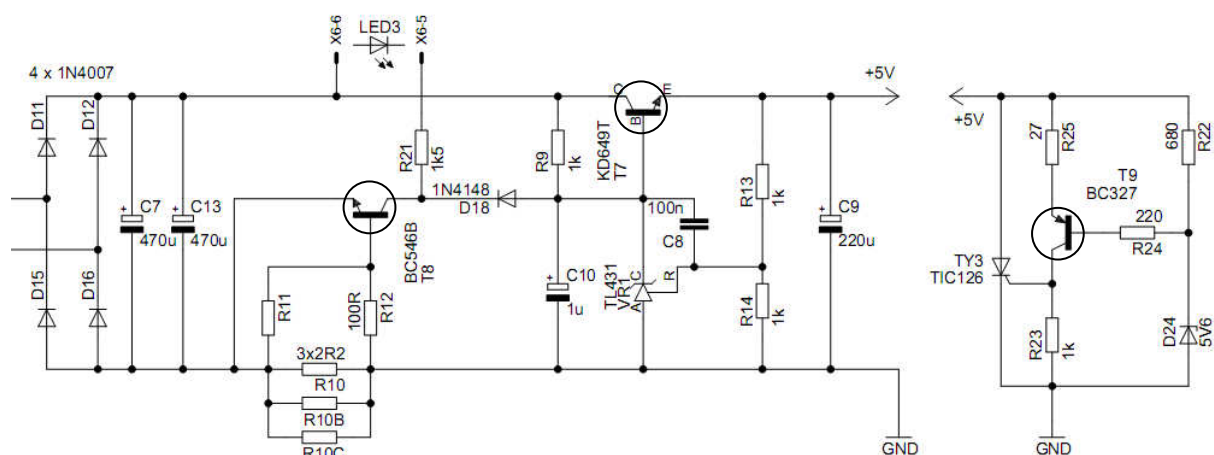
Při výstupním napětí 5 V a odebíraném max. proudu 0,9 A vzniká na výstupním tranzistoru výkonová ztráta:

$$P_{\text{TOT}} = (U_{\text{NAP}} - U_{\text{VÝST}}) \cdot I = (12,7 - 5) \cdot 0,9 = 7 \text{ W}$$

Rozdíl mezi teplotou přechodu tranzistoru a okolím chladiče:

$$\Delta \vartheta_{\text{j-a}} = P_{\text{TOT}} \cdot R_{\text{TH}} = 7 \cdot 8,2 = 57,4 \text{ K} = 57,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Při max. povolené teplotě přechodu  $\vartheta_{\text{jmax}} = 150$   $^{\circ}\text{C}$  by tedy teplota okolního prostředí chladiče mohla být  $\vartheta_{\text{amax}} = \vartheta_{\text{jmax}} - \vartheta_{\text{j-a}} \approx 90$   $^{\circ}\text{C}$ , což je dostačující. Nicméně rezerva je nutná s ohledem na alespoň krátkodobou zkratovou odolnost zdroje, kdy je ztrátový výkon výstupního tranzistoru vyšší (cca 11,5 W,  $\vartheta_{\text{amax}} \approx 55$   $^{\circ}\text{C}$ ).

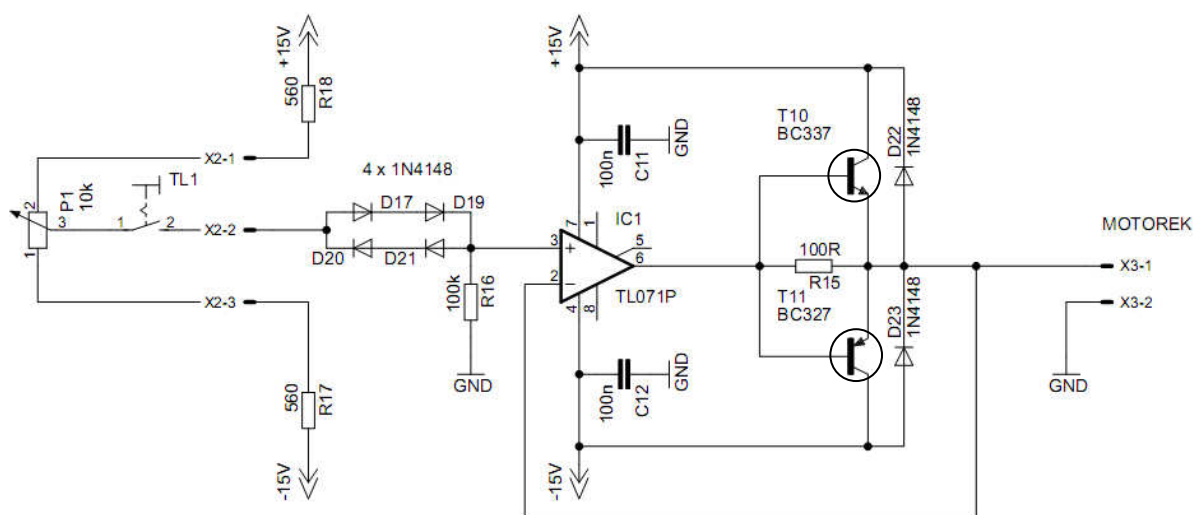


Obr. 34 Schéma zapojení zdroje +5 V

### Regulátor poháněcího motorku

Motorek je mechanicky spojen s IRC a revolverem a umožňuje tedy změnu úhlu natočení. Použitý motorek obsahuje převodovku, takže výstupní otáčky jsou dostatečně malé. Jmenovité napětí motorku je 12 V, proud naprázdno <20 mA a převodový poměr cca 1470:1. Jedná se o výrobek italské firmy Micromotors, typ B138F.12.1470 a bližší informace lze nalézt v katalogovém listě [10].

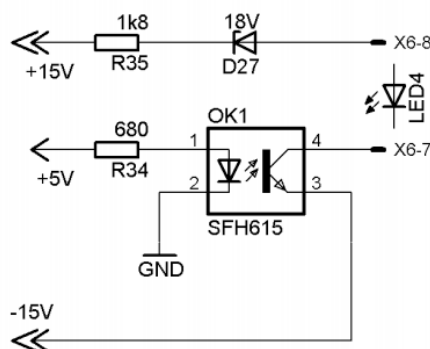
Vlastní regulátor je velmi jednoduchý a je tvořen OZ zapojeným jako sledovač s výkonovým tranzistorovým koncovým stupněm. Řídící napětí je získáváno z potenciometru P1, na němž je napětí z intervalu  $\pm 13,5$  V (dáno hodnotami P1, R17 a R18). Tlačítko TL1 slouží v podstatě k zapínání regulátoru. Vstupní diody D17 až D21 vytvářejí určité pásmo necitlivosti v oblasti nulových otáček (poloviční natočení P1). Diody D22, D23 slouží jako nulové diody, neboť motorek je zátěž induktivního charakteru. R16 uzemňuje vstup OZ při rozepnutém tlačítku.



Obr. 35 Zapojení regulátoru pro poháněcí motorek

### Signalizace výstupních napětí

Obvod se skládá z optočlenu (LED – fototranzistor), jehož vysílač je napájen ze zdroje +5 V a výstupní tranzistor spínající indikační svítivou diodu (LED4) je napájen napětím  $\pm 15$  V. R34 omezuje proud vysílací diodou optočlenu, R35 proud indikační diodou a přijímacím tranzistorem optočlenu. Při výpadku napětí +15 V nebo -15 V LED nesvítí, protože není otevřena D27 a při výpadku +5 V je vypnut optočlen, takže LED opět nesvítí.



Obr. 36 Schéma zapojení signalizace napětí

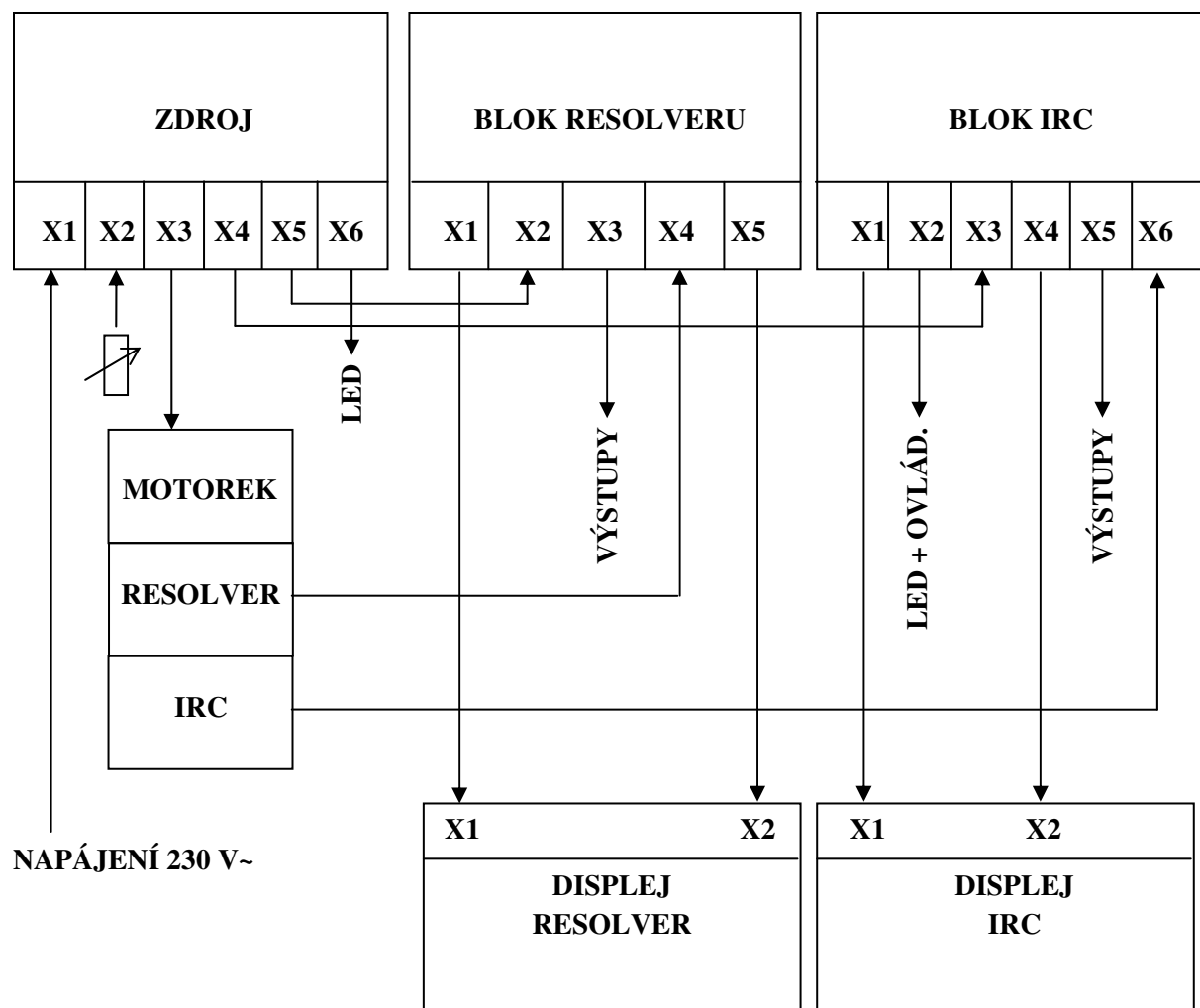
## 5.5 Konstrukční uspořádání

Všechny moduly (kap. 5.1 až 5.4) jsou umístěné na jednostranných DPS. Výkresy DPS, rozmístění součástek a jejich rozpis je uveden v přílohách č. 5 až 8. DPS byly vyrobeny tzv. negativní fotocestou. Tato metoda má oproti rozšířenější „pozitivní metodě“ výhodu v tom, že pokud dojde k nedokonalému osvětlení desky UV světlem (tj. někde se osvítí i to, co nemá), projeví se to přebytkem mědi na výsledné DPS, což lze v menší míře upravit (např. vyškrabáním), ale u „pozitivní metody“ dochází k nevratnému odleptání dané části spoje. Desky byly navrženy v programu Eagle.

Přípravek je vestavěn do plechové přístrojové skříňky, přední a zadní panel je z novoduru. Na čelním panelu jsou umístěny displeje, indikační LED, síťový vypínač s pojistkou, výstupní svorky pro signály ze snímačů a další ovládací prvky. Sestava snímačů a motorku je namontována na horní straně skříňky. Vzhledem k síťovému napájení je skříňka přístroje uzemněna. Je třeba upozornit, že výstupní svorky GND jsou rovněž spojeny se zemí (přes kostru IRC). To je ostatně běžné pro řadu měřicích přístrojů se síťovým napájením (osciloskopy, generátory, čítače apod.) a při běžných měřeních (na výstupních svorkách vztažených ke GND) to ničemu nevadí.

Pro rozebrání přístroje je nutné povolit 4 šrouby na bočních stěnách skříňky, horní část lze pak vysunout směrem nahoru (pozor na vodiče ke snímačům).

Jednotlivé moduly jsou mezi sebou propojeny pomocí vodičů s plochými řadovými konektory, což umožňuje vyjmutí samostatného modulu. Na obr. 37 je uvedeno schéma propojení jednotlivých bloků, konkrétní osazení konektorů lze najít v dokumentaci v příloze.



Obr. 37 Schéma propojení jednotlivých bloků přístroje



## 6. Vzorový protokol pro měření

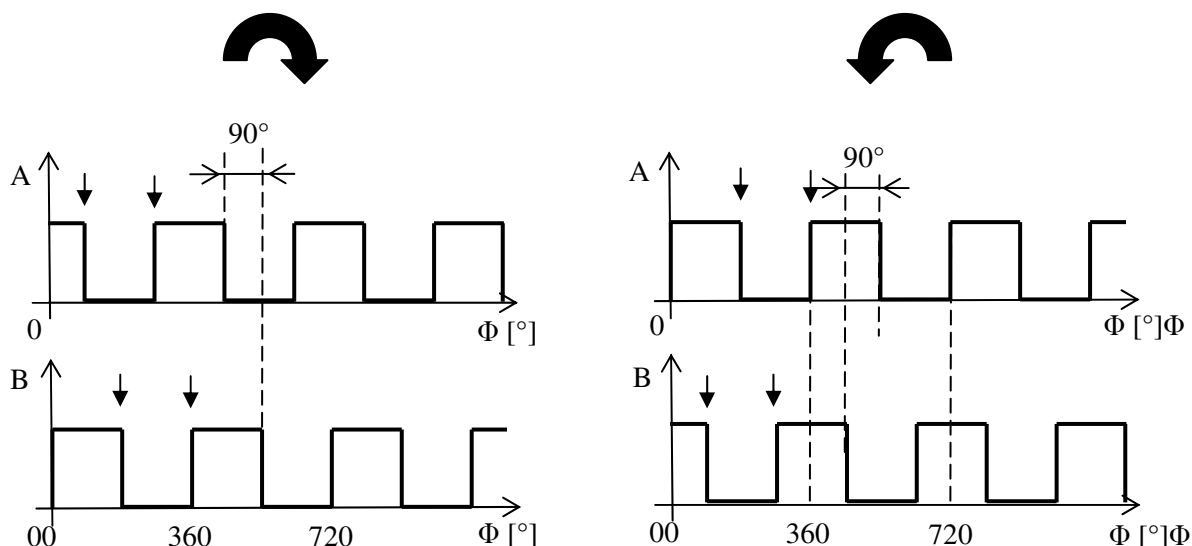
### Zadání:

- 1) Změřte základní signály A, B, NUL inkrementálního snímače při různých směrech otáčení a porovnejte je. (Pro zachycení NUL pulsu je vhodné nastavit osciloskop na jednorázové spouštění právě NUL pulsem („trigger source“ – vstup, kde je připojen NUL, „trigger mode“ – „single“).
- 2) Změřte napětí a kmitočet budícího signálu resolveru (svorka REF) a porovnejte je se jmenovitými hodnotami ( $U_{REF} = 7 \text{ V}_{ef}$ ;  $f = 10 \text{ kHz}$ ). Změřený průběh přiložte k protokolu.
- 3) Porovnejte hodnoty z IRC a resolveru. Nastavte hodnotu  $0^\circ$  dle resolveru a vynulujte čítač IRC (pomocí červeného nulovacího tlačítka na měřicím přípravku (přepínač NULOVÁNÍ v poloze RUČNĚ)). Výsledky měření запиšte do tabulky. Pro několik zvolených hodnot úhlů vypočítejte úhel ze změřených napětí  $U_{SIN}$  a  $U_{COS}$ . Naměřené průběhy přiložte k protokolu.
- 4) Zjistěte, jakému úhlu (dle resolveru) odpovídá výchozí bod inkrementálního snímače (NUL). Přepínač „NULOVÁNÍ“ přepněte do polohy „AUTO (NUL)“ a během otáčení sledujte, při jaké hodnotě úhlu se rozsvítí kontrolka „SYNC“ a dojde k vynulování čítače IRC.
- 5) Změřte průběh výstupního signálu IRC „4x“ (4096 pulsů za 1 otáčku) a vypočítejte rychlost otáčení z doby periody signálu. Změřený průběh přiložte k protokolu.

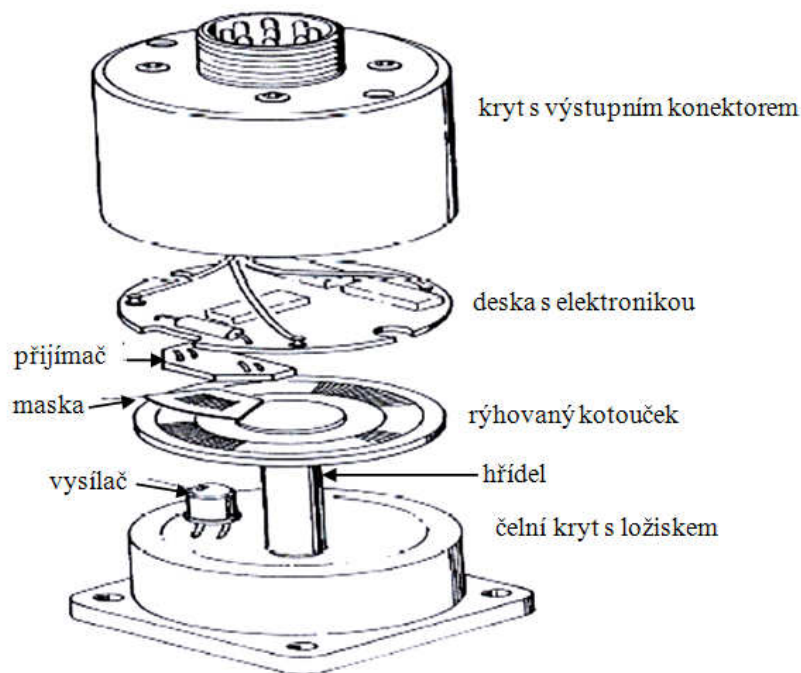
$$n = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{4096} \cdot 60 \text{ [ot/min; s]}$$

### Teoretický rozbor:

**Inkrementální snímač (IRC)** pracuje na optoelektrickém principu (světelný paprsek prochází clonou a dopadá na přijímací fotonku). Na výstupu IRC jsou dráhové pulsy A, B obdélníkového průběhu navzájem posunuté o  $90^\circ$ . Podle fáze signálů lze rozlišit směr otáčení (obr. 38).



Obr. 38 Průběhy výstupních signálů IRC



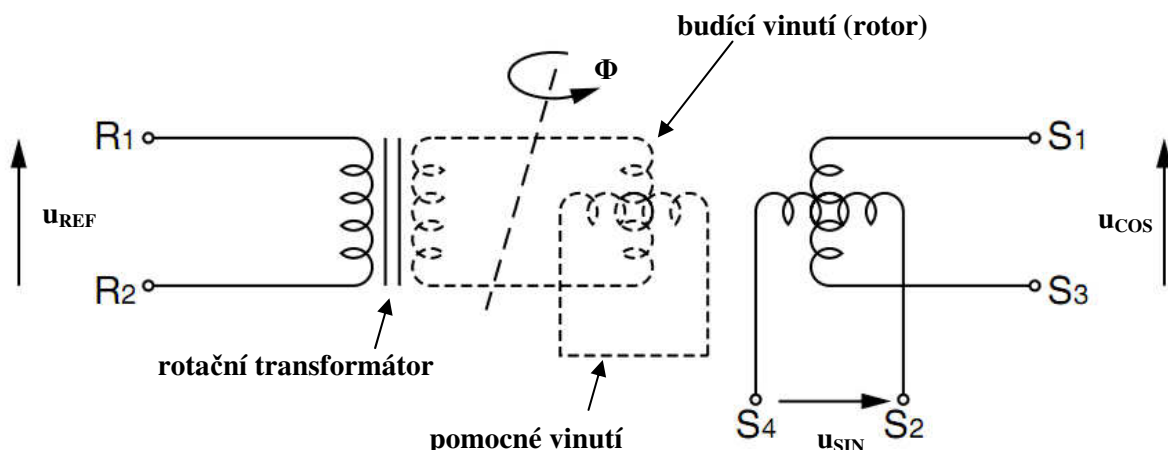
**Obr. 39** Součásti inkrementálního snímače

Aby bylo možné určit polohu snímače vůči nějakému pevnému bodu, je jednou za otáčku vysílán tzv. nulový puls (NUL), jehož poloha je stanovena. NUL puls bývá obvykle synchronní se signálem A. Kromě základních signálů A, B a NUL jsou ze snímače vyvedeny negace těchto signálů (/A, /B, /NUL). Vyhodnocovací obvody obvykle zpracovávají všechny tyto signály (kontrola dat, větší odolnost proti rušení...). IRC použitý v měřicím přípravku (LARM IRC315/1024 PA) je napájen napětím 5 V, výstupy jsou ve standardní úrovni TTL a rozlišení snímače je 1024 imp/ot.

Pro dosažení vyššího rozlišení dochází ve vyhodnocovacím obvodu ke znásobení pulsů 4x, takže pro daný typ IRC je pak výsledné rozlišení 4096 imp/ot. Velikost úhlu lze na základě počtu pulsů

$$\text{vypočítat: } \phi_{IRC} = \frac{\text{pulsy}}{4096} \cdot 360 [^{\circ}, -]$$

Resolver pracuje na elektromagnetickém principu, skládá se ze dvou statorových vinutí (navzájem otočených o 90°) a rotorového vinutí. Princip funkce resolveru je zřejmý z obr. 40. Budící napětí prochází do rotoru přes rotační transformátor (bezkontaktní přenos). Pomocné vinutí potlačuje nežádoucí kolmou složku budícího signálu. Na statorových cívkách se indukuje napětí proměnné amplitudy (při otáčení se mění i fáze vůči budícímu napětí (0 nebo 180°).



**Obr. 40 Zapojení resolveru**

Výsledný úhel natočení lze při buzení rotoru vypočítat dle vztahů:

$$u_{REF} = U_{REFM} \cdot \sin(\omega t) = U_{REFM} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

$$u_{SIN} = K \cdot u_{REF} \cdot \sin(\phi)$$

$$u_{COS} = K \cdot u_{REF} \cdot \cos(\phi)$$

$u_{REF}$  [V] .....okamžitá hodnota budícího napětí (v čase  $t$ )

$U_{REFM}$  [V] ..... amplituda budícího napětí

$f$  [Hz] ..... frekvence budícího napětí

$K$  ..... konstanta resolveru (daná převodem rotačního transformátoru, počty závitů vinutí...)

$\Phi$ .....úhel natočení rotoru

Podělením změřených hodnot indukovaných satorových napětí lze zjistit natočení rotoru  $\Phi$ :

$$\frac{u_{SIN}}{u_{COS}} = \frac{K \cdot u_{REF} \cdot \sin(\phi)}{K \cdot u_{REF} \cdot \cos(\phi)} = \frac{\sin(\phi)}{\cos(\phi)} = \operatorname{tg}(\phi) \Rightarrow \phi = \operatorname{arctg} \frac{U_{SIN}}{U_{COS}}$$

V ideálním případě by tedy platilo, že napětí  $U_{SIN}$  je nulové při úhlu 0 a 180° a  $U_{COS}$  při úhlu 90 a 270°. Prakticky je na výstupu zbytkové napětí řádově desítky mV.

Protože výsledný úhel  $\Phi$  je v intervalu 0 až 90°, je nutné provést přepočet úhlu do správného kvadrantu podle pravidla:

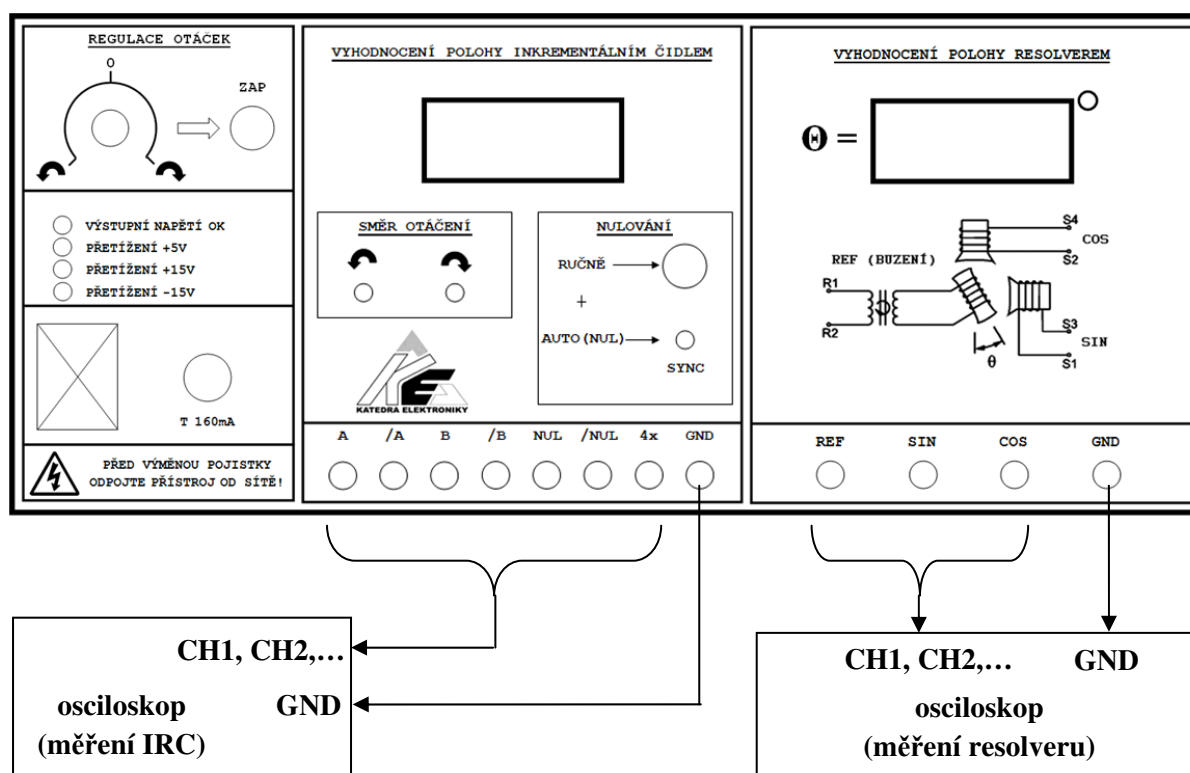
1. kvadrant (0 až 90°):                      beze změny
2. kvadrant (90 až 180°):                      180° -  $\Phi$
3. kvadrant (180 až 270°):                      180 +  $\Phi$
4. kvadrant (270 až 360°):                      360 -  $\Phi$

Resolver použitý v přípravku je typu ATAS ER5Kd286 ( $U_{REF} = 7 \text{ V}_{ef}$ ,  $f = 10 \text{ kHz}$ ,  $K = 0,5$ ).

V praxi se IRC a resolvery používají jako poměrně velmi přesné snímače polohy v oblasti regulovaných pohonů a automatizace, nicméně ve zjednodušené podobě se používají i v běžné spotřební elektronice (otáčení kolečka u počítačové myši je snímáno jednoduchým IRC).

### Pokyny k měření:

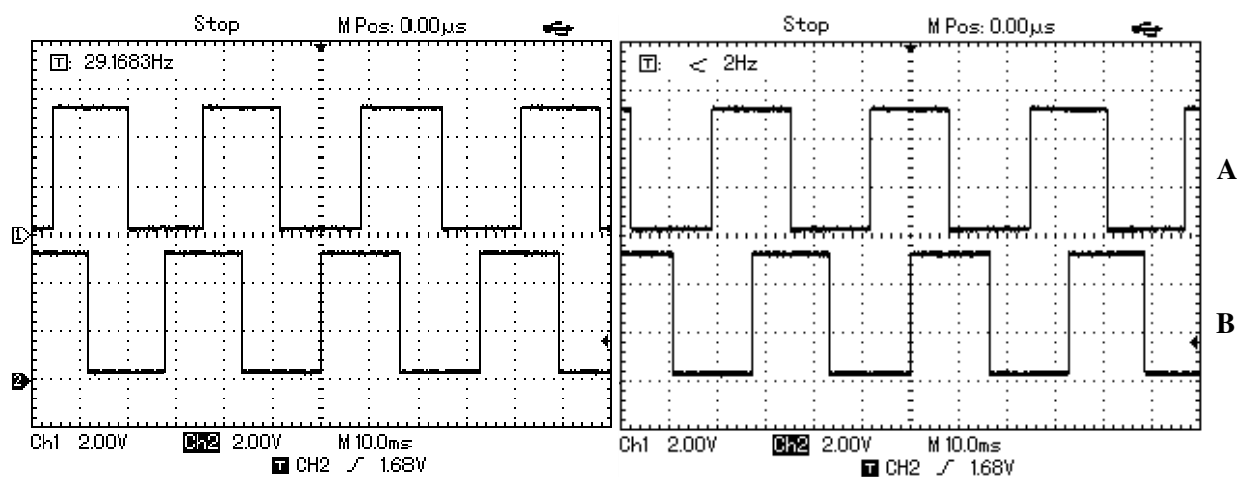
- 1) Zkontrolujte, zda se po zapnutí přípravku rozsvítí zelená LED na panelu zdroje („VÝSTUPNÍ NAPĚTÍ OK“). Pokud ne, neprodleně vypněte přístroj!
- 2) Měřicí přístroj (osciloskop) se zapojuje na výstupní svorky vždy mezi zem („GND“) a danou signálovou svorku. Svorky „GND“ jsou spojeny s kostrou přístroje. Při měření na IRC je vhodnější stejnosměrná vazba (DC), protože výstupní signál má při nízkých otáčkách nízký kmitočet a docházelo by ke zkreslení (obr. 52).
- 3) Na panelu regulace otáček se regulačním potenciometrem volí požadovaný směr a rychlost otáčení, po dobu otáčení je třeba držet stisknuté zelené tlačítko „ZAP“.
- 4) Na panelu IRC jsou umístěny indikační LED udávající aktuální směr otáčení a ovládání nulování displeje. V poloze „RUČNĚ“ se nulování provádí červeným tlačítkem, v poloze „AUTO/NUL“ se displej vynuluje s příchodem nulového pulsu a zároveň se rozsvítí kontrolka „SYNC“ (zobrazená hodnota se počítá od nulového bodu IRC). Je-li kontrolka „SYNC“ zhasnutá, hodnota na displeji se vztahuje k nějakému obecnému počátku.



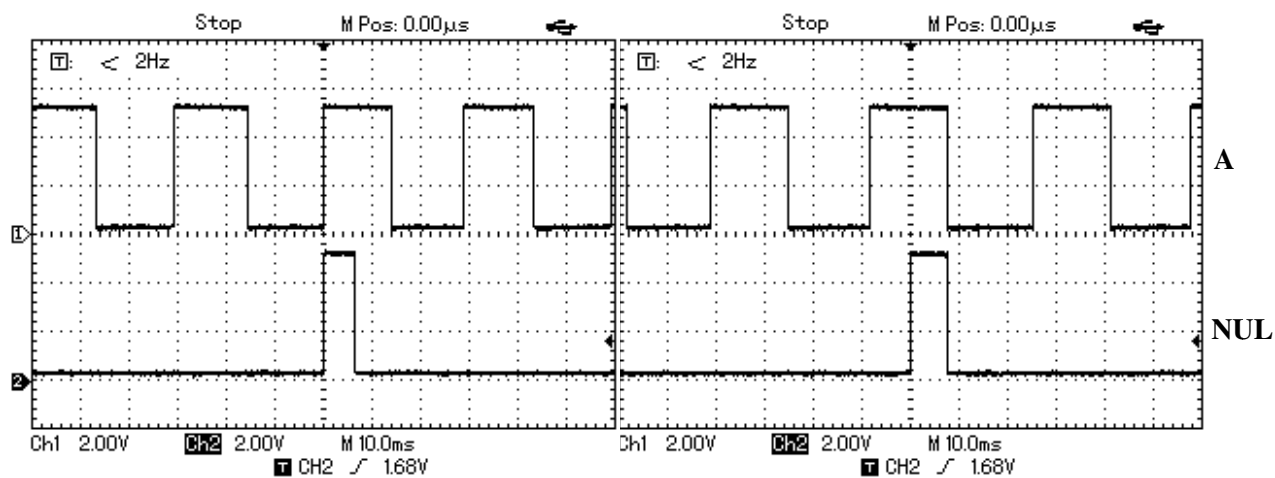
Obr. 41 Zapojení přípravku při měření

### Vlastní měření:

#### 1) Výstupní signály IRC

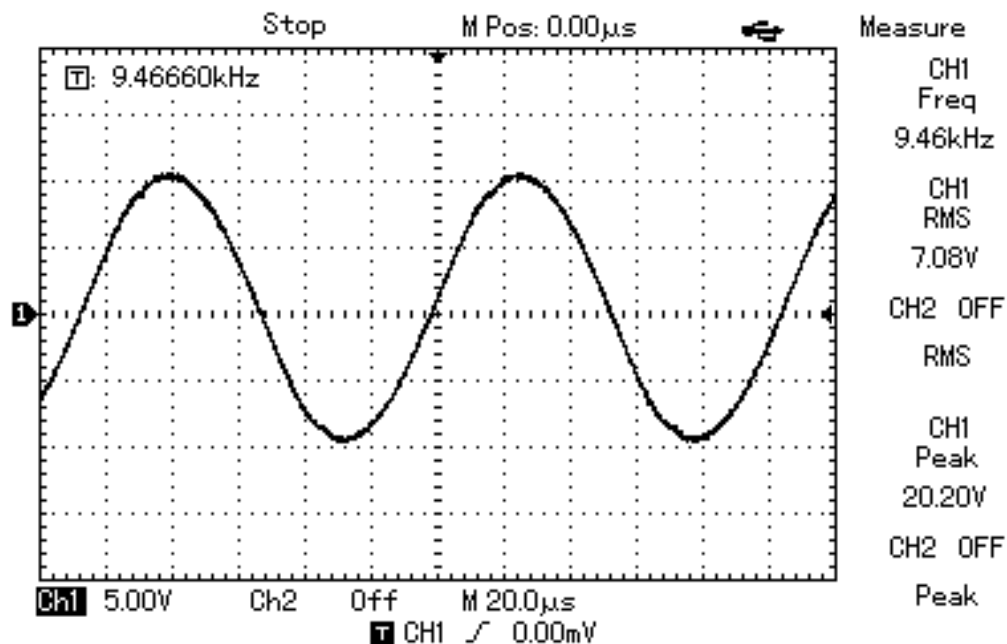


Obr. 42 Průběhy signálů A, B při otáčení různými směry



Obr. 43 Průběhy NUL pulsu při různých směrech otáčení

2) Budící signál resolveru



Obr. 44 Průběh budícího napětí resolveru

3) Porovnání hodnot resolveru a IRC

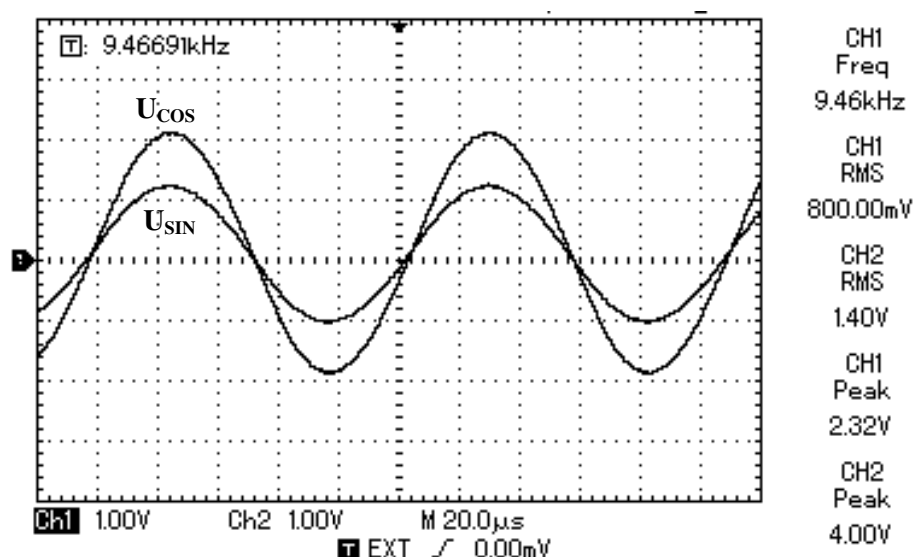
Tab. 3 Porovnání naměřených hodnot IRC a resolveru

resolver				IRC		odchylka
$\Phi_{RES} [^\circ]$	$U_{SIN} [V]$	$U_{COS} [V]$	$\Phi_{VYP} [^\circ]$	pulsy	$\Phi_{IRC} [^\circ]$	$\Phi_{RES} - \Phi_{IRC}$
0	0,04	1,57	1,35	0	0,00	0,00
10	0,27	1,54	10,09	114	10,02	-0,02
20	0,54	1,47	20,10	230	20,21	-0,21
30	0,79	1,35	30,18	343	30,15	-0,15
40	0,99	1,20	39,61	454	39,90	0,10
50	1,20	1,01	49,91	570	50,10	-0,10
60	1,36	0,78	60,10	685	60,21	-0,21
70	1,47	0,53	70,17	800	70,31	-0,31
80	1,54	0,28	79,80	909	79,89	0,11
90	1,57	0,00	89,94	1032	90,70	-0,70
100	1,54	0,26	99,73	1139	100,11	-0,11
110	1,47	0,53	109,65	1254	110,21	-0,21
120	1,35	0,77	119,60	1369	120,32	-0,32
130	1,19	1,01	130,32	1481	130,17	-0,17
140	1,00	1,21	140,43	1594	140,10	-0,10
150	0,77	1,36	150,36	1707	150,03	-0,03
160	0,53	1,48	160,40	1820	159,96	0,04

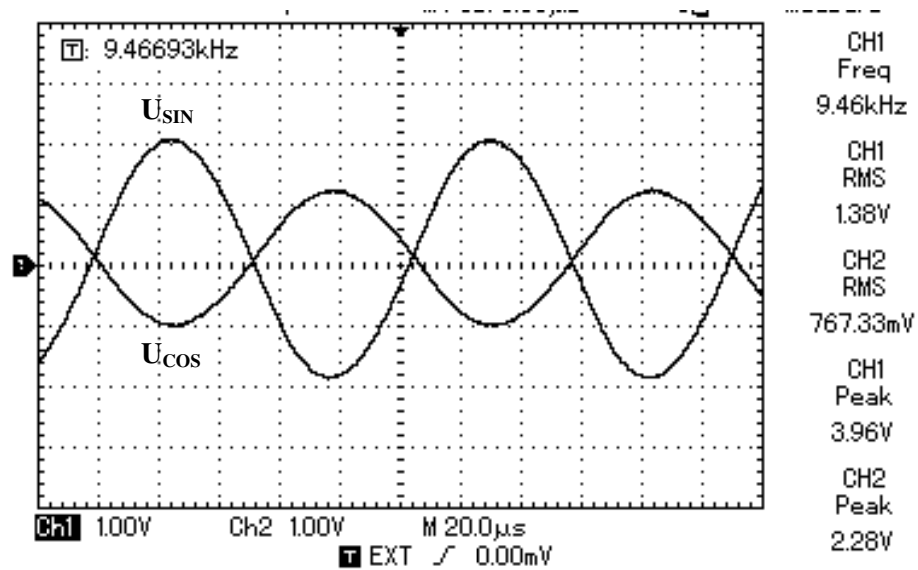
170	0,28	1,55	169,94	1933	169,89	0,11
180	0,04	1,58	178,62	2049	180,09	-0,09
190	0,27	1,56	189,82	2160	189,84	0,16
200	0,52	1,48	199,50	2273	199,78	0,22
210	0,76	1,38	208,94	2381	209,27	0,73
220	0,98	1,23	218,60	2497	219,46	0,54
230	1,21	1,03	229,59	2609	229,31	0,69
240	1,37	0,81	239,50	2723	239,33	0,67
250	1,48	0,55	249,48	2840	249,61	0,39
260	1,56	0,29	259,54	2953	259,54	0,46
270	1,58	0,02	269,42	3071	269,91	0,09
280	1,55	0,26	279,38	3182	279,67	0,33
290	1,48	0,52	289,29	3296	289,69	0,31
300	1,36	0,76	299,29	3413	299,97	0,03
310	1,21	0,98	308,92	3523	309,64	0,36
320	1,02	1,18	319,16	3638	319,75	0,25
330	0,79	1,34	329,48	3752	329,77	0,23
340	0,55	1,45	339,23	3862	339,43	0,57
350	0,29	1,53	349,45	3979	349,72	0,28
360	0,04	1,56	358,53	4094	359,82	0,18

Příklad výpočtu pro  $\Phi = 240^\circ$ :

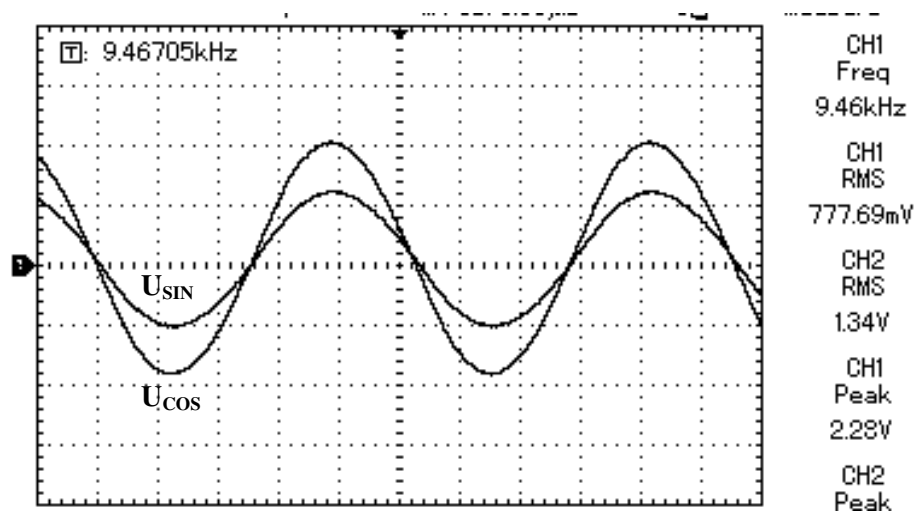
$$\phi_{VYP} = \arctg\left(\frac{U_{SIN}}{U_{COS}}\right) = \arctg\left(\frac{1,37}{0,81}\right) = \arctg(1,69) = \underline{\underline{59,4^\circ}} \xrightarrow{3.kvadrant} \phi_{VYP} = 180 + 59,4 = \underline{\underline{239,4^\circ}}$$



Obr. 45 Průběh výstupních signálů při  $\Phi = 30^\circ$

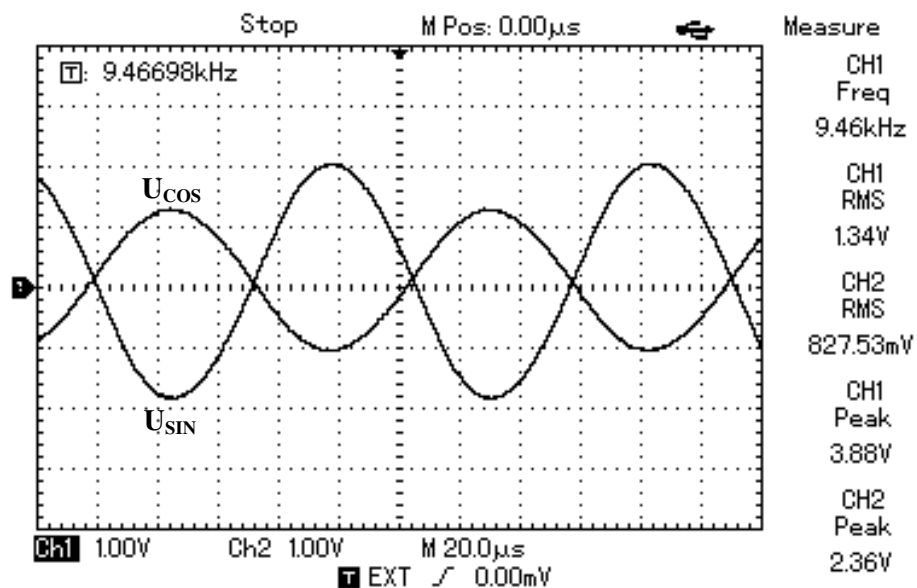


Obr. 46 Průběh výstupních signálů při  $\Phi = 120^\circ$



Obr. 47 Průběh výstupních signálů při  $\Phi = 210^\circ$





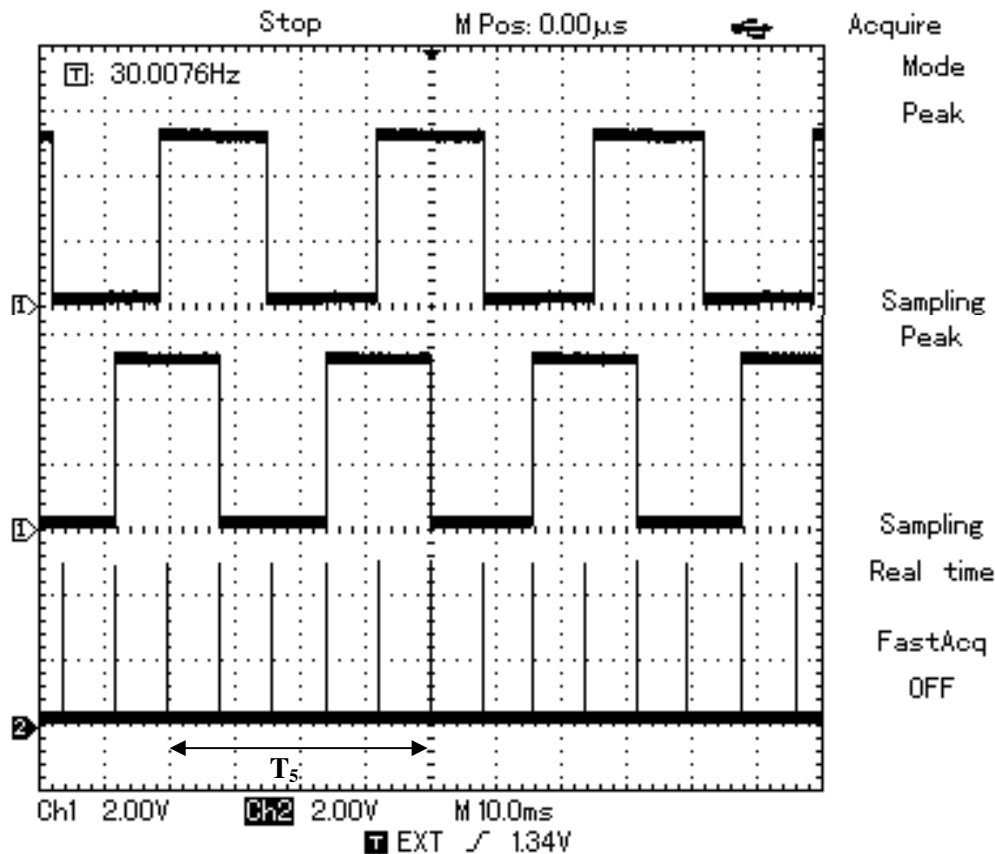
Obr. 48 Průběh výstupních signálů při  $\Phi = 300^\circ$

Tab. 4 Zjednodušená tabulka pro účely laboratorního měření

resolver			IRC	
$\Phi_{\text{RES}} [^\circ]$	$U_{\text{SIN}} [\text{V}]$	$U_{\text{COS}} [\text{V}]$	pulsy	$\Phi_{\text{IRC}} [^\circ]$
0			0	0,00
30				
60				
90				
120				
150				
180				
210				
240				
270				
300				
330				
360				

4) Nulovému bodu IRC odpovídá dle resolveru úhel  $321^\circ$ .

5) Výpočet rychlosti otáčení



Obr. 49 Průběhy signálů A, B a 4x

Výpočet otáček:

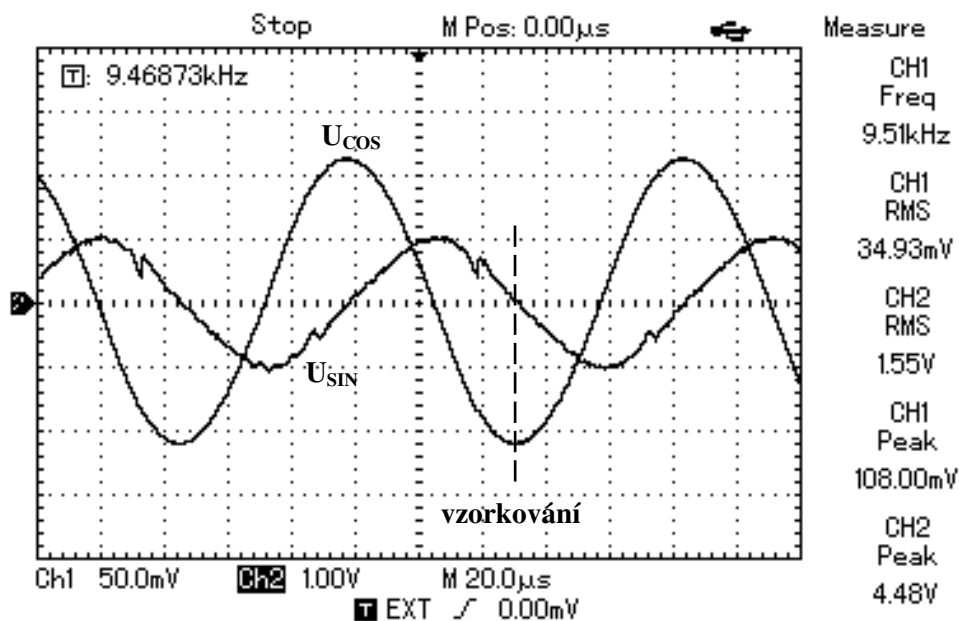
$$T = \frac{T_s}{5} = \frac{40}{5} = 8 \text{ ms}$$

$$n = \frac{1}{T} \cdot \frac{60}{4096} = \frac{1}{0,008} \cdot \frac{60}{4096} = 1,83 \text{ ot/min}$$

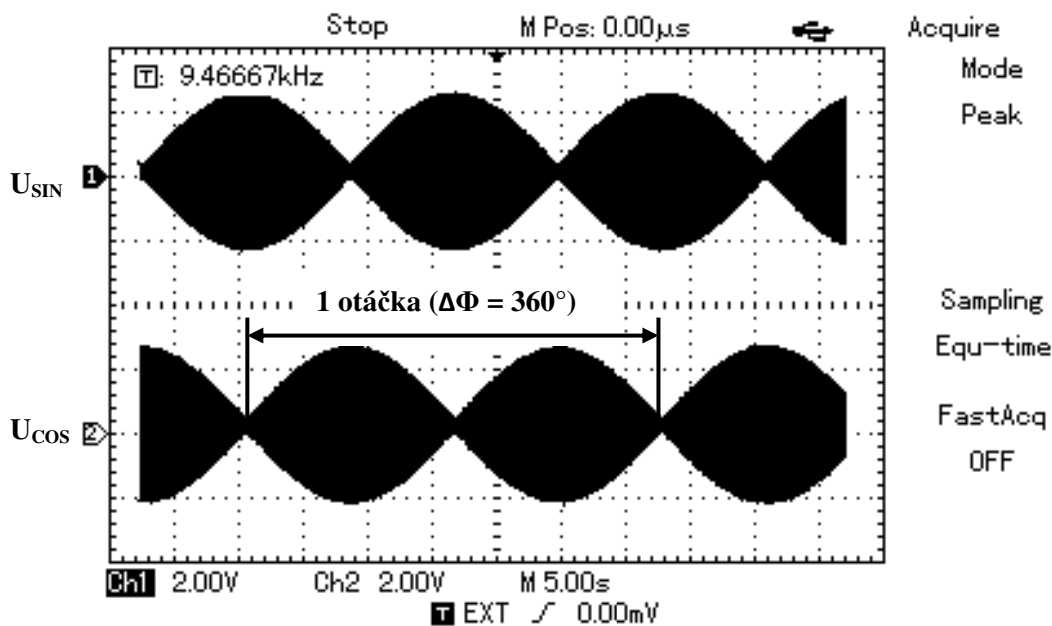
**Závěr:** Z měření na IRC vyplývá, že mezi hlavními signály A, B je fázový posun  $90^\circ$  - při jednom směru otáčení „A předbíhá B“, při opačném směru „B předbíhá A“, takže je možné vyhodnotit směr otáčení (obr. 42). Nulový puls, vysílaný 1x za otáčku je synchronní se signálem A a má poloviční šířku (obr. 43).

Při měření na resolveru bylo zjištěno, že parametry budícího signálu (7,08 V; 9,46 kHz) se mírně liší od jmenovitých hodnot (7 V; 10 kHz), což ale nemá vliv na funkci. Z porovnání IRC a resolveru (tab. 3) vyplývá, že údaje se přibližně shodují (rozdíl údajů je v rozmezí  $\pm 0,7^\circ$ ). Hodnoty vypočítaných úhlů  $\Phi_{VYP}$  se liší více, protože při výpočtu bylo počítáno s efektivními hodnotami. Na obr. 43 je zachycen průběh  $U_{SIN}$  a  $U_{COS}$  při  $\Phi = 0^\circ$ . Teoreticky by  $U_{SIN}$  mělo být nulové, nicméně ve

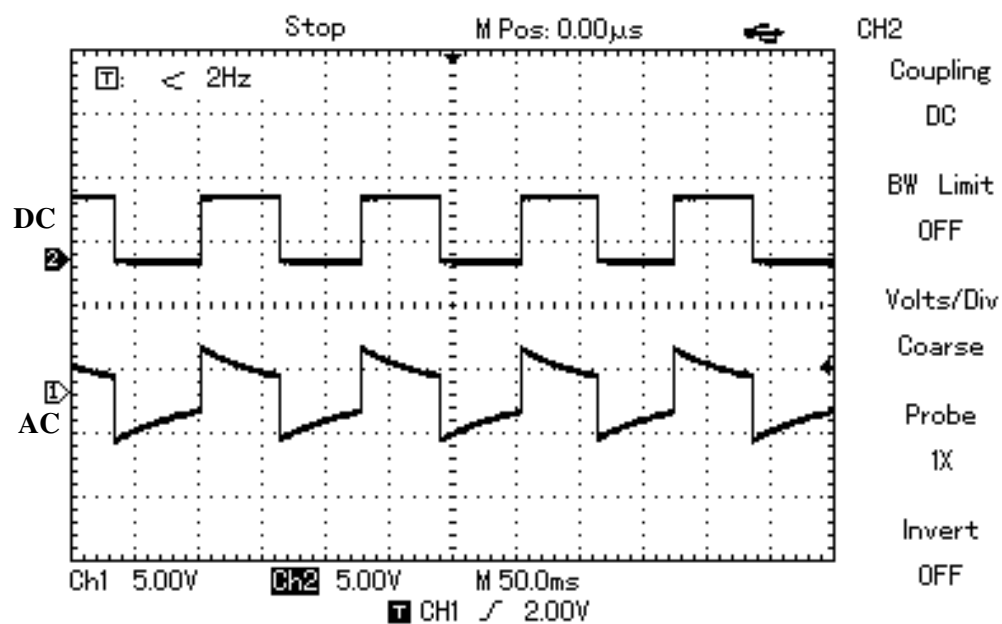
skutečnosti dosahuje efektivní hodnoty cca 35 mV a výsledný úhel vychází 1,35°. Z průběhu je zřejmý fázový posun mezi napětími, protože při nulovém úhlu se postupně mění fáze signálu  $U_{\text{SIN}}$ . Protože MCU v přístroji počítá úhel z okamžitých navzorkovaných hodnot, vychází úhel opravdu 0° (okamžitá hodnota  $U_{\text{SIN}}$  v čase vzorkování je takřka nulová) – viz obr. 50. Z průběhů na obr. 45 až 48 jsou patrné rozdíly ve fázi výstupních napětí oproti budicímu napětí (to není zakresleno, ale jeho průběh odpovídá obr. 44). Pro zajímavost je obr. 51 zachycen průběh  $U_{\text{SIN}}$  a  $U_{\text{COS}}$  během otáčení, výsledný průběh tvoří modulační obálku, přičemž tmavá výplň je tvořena 10kHz sinusovkou s proměnnou amplitudou.



Obr. 50 Průběhy signálů  $U_{\text{SIN}}$  a  $U_{\text{COS}}$  při  $\Phi = 0^\circ$



Obr. 51 Průběhy signálů  $U_{\text{SIN}}$  a  $U_{\text{COS}}$  během otáčení



Obr. 52 Výstupní průběhy IRC při DC a AC vazbě

## 7. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navržení a sestavení přípravku pro laboratorní měření na IRC a resolveru, což jsou v současné době velmi často používané snímače v oblasti regulace elektrických pohonů. Přípravek umožňuje jednoduchým způsobem změřit charakteristické výstupní průběhy jednotlivých typů snímačů a porovnat informaci o poloze rotoru (úhlu natočení), neboť výstupní data jsou zobrazována na displejích. Změna úhlu natočení je prováděna pomocí obousměrně regulovaného motorku s převodovkou, protože ruční nastavování by bylo značně nepraktické. Díky tomu, že přípravek obsahuje všechny nezbytné obvody pro vyhodnocení polohy a vlastní napájecí zdroj, nepotřebuje ke své činnosti žádné další přístroje. S ohledem na použití pro školní účely a možné špatné připojení měřicích přístrojů k výstupním svorkám přípravku, jsou všechny výstupy trvale zkratuvzdorné a odolné vůči připojení vnějšího napětí do cca  $\pm 30$  V (což je běžný napěťový rozsah používaných laboratorních zdrojů, generátorů apod.). Napájecí zdroj v přípravku je vybaven proudovým omezením (se signalizací přetížení LED) a přepětovou ochranou (omezuje výstupní napětí při závadě zdroje).

V obou vyhodnocovacích obvodech (IRC, resolver) jsou využity MCU Atmel AVR, přičemž programy byly napsány v jazyce C v prostředí AVR Studio. MCU lze v některých případech programovat přímo v zapojení (ICSP), na desce resolveru je pro tento účel osazen konektor. [23]

Kontrolním měřením bylo zjištěno, že údaje získané z IRC a resolveru se v podstatě shodují. Drobné odchylky a rozdíly jsou dány především malou rozlišovací schopností bloku resolveru oproti IRC. To je dáno jednoduchou konstrukcí vyhodnocovacího bloku resolveru, který je sestaven z „obyčejných“ integrovaných obvodů. S použitím speciálních IO určených přímo pro vyhodnocení dat z resolveru (R/D převodníků), je možné docílit rozlišení srovnatelného s IRC, případně i lepšího (16bit R/D).

Z hlediska dalších vylepšení přípravku by patrně bylo možné zvýšit rozlišovací schopnosti vyhodnocovacího obvodu resolveru (úpravy programu lze provádět jednoduše pomocí zmíněného programovacího konektoru). V případě potřeby výraznějšího rozšíření programu je možné vyměnit použitý MCU typu ATmega 48 za typy s větší programovou pamětí ATmega 88 (8 KB), příp. ATmega 168 (16 KB), protože z hlediska zapojení vývodů jsou záměnné.

Vyhodnocovací obvod pro IRC by bylo možné upravit pro testování správné funkce snímačů (kontrola počtu pulsů, výpadku některého ze signálů, zobrazení rychlosti otáčení apod.). V takovém případě by bylo vhodné upravit vstupní obvody tak, aby bylo možné připojit i jiné typy IRC (se sinusovým výstupem, otevřeným kolektorem apod.).

## Použitá literatura:

- [1] 4543. Katalogový list, [cit. 27. února 2013]  
<http://www.gme.cz/dokumentace/427/427-118/dsh.427-118.1.pdf>
- [2] 74HC123. Katalogový list, [cit. 4. října 2012]  
<http://www.gme.cz/dokumentace/425/425-029/dsh.425-029.1.pdf>
- [3] 74HC193. Katalogový list, [cit. 4. října 2012]  
<http://www.gme.cz/dokumentace/425/425-055/dsh.425-055.1.pdf>
- [4] 74HC244. Katalogový list, [cit. 15 listopadu 2012]  
<http://www.gme.cz/dokumentace/425/425-064/dsh.425-064.1.pdf>
- [5] ATmega 48. Katalogový list, [cit. 25. října 2012]  
[www.atmel.com/images/doc2545.pdf](http://www.atmel.com/images/doc2545.pdf)
- [6] ATtiny 2313. Katalogový list, [cit. 25. října 2012]  
[www.atmel.com/Images/doc2543.pdf](http://www.atmel.com/Images/doc2543.pdf)
- [7] BELZA, J. Napěťový regulátor TL431C. *Amatérské rádio*. 1993, č. 5, s. 15.
- [8] BRANDŠTETTER, P. *Technické prostředky pro řízení elektrických pohonů*. VŠB-TU Ostrava, 2005.
- [9] BrushlessresolversSmartsyn®. Katalogový list, [cit. 2. března 2013]  
[http://cn.100y.com.tw/pdf\\_file/79-TAMAGAWA.pdf](http://cn.100y.com.tw/pdf_file/79-TAMAGAWA.pdf)
- [10] GearmotorsSeries B138F. Katalogový list, [cit. 30. prosince 2012]  
[http://www.micromotorssl.com/motor\\_b138f/B138\\_F.pdf](http://www.micromotorssl.com/motor_b138f/B138_F.pdf)
- [11] Inkrementální rotační snímače IRC 300 – 325. Katalogový list, [cit. 2. března 2013]  
[http://www.larm.cz/pages/larm\\_html\\_cz/pdf/irc300-325.pdf](http://www.larm.cz/pages/larm_html_cz/pdf/irc300-325.pdf)
- [12] LF398. Katalogový list, [cit. 25. října 2012]  
<http://www.gme.cz/dokumentace/311/311-030/dsh.311-030.1.pdf>
- [13] Návod – inkrementální optické čidlo IRC 110. ZPA Košíře, [198-]
- [14] PANTLÍK, T. *Regulace polohy s revolverem*. Ostrava: VŠB-TU. Fakulta elektrotechniky a informatiky. Katedra výkonové elektroniky a elektrických pohonů, 2007. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Pavelek, Ph.D.
- [15] Rotační kodéry. Katalogový list, [cit. 21. února 2013]  
<http://www.gme.cz/inkrementalni-spinace/p-re24-p532-089/#dokumentace>
- [16] Schéma zapojení zdroje EA1605HC. Tesla Třinec, 1988.
- [17] Simodrive 611 PlanningGuide. Siemens, [cit. 10. února 2013]  
[www.automation.siemens.com/doconweb/pdf/840C\\_1101\\_E/611\\_PJU.pdf](http://www.automation.siemens.com/doconweb/pdf/840C_1101_E/611_PJU.pdf)
- [18] STAEBLER, M. *TMS320F240 DSP SolutionforObtainingResolverAngularPosition and Speed*. Texas Instruments, 2000, [cit. 27. října 2012]  
[www.ti.com/lit/an/spra605/spra605.pdf](http://www.ti.com/lit/an/spra605/spra605.pdf)
- [19] ŠMEJKAL, L. Devadesátiletý příběh elektrotechnické výroby v Kolíně. *Automatizace*. 2009, roč. 52, č. 6, s. 358. [cit. 23. února 2013]  
<http://www.automatizace.cz/article.php?a=2560>
- [20] *Technický popis systému NS 361*. Tesla Kolín, 1977.
- [21] Testovací generátor 1 V/1 kHz s nepatrnou spotřebou. *Praktická elektronika A Radio*. 2005, č. 12, s. 8.

- [22] TISCHLER, V., KLEMPERER I. *Číslicové řídicí systémy řady NS 600*. Praha: SNTL, 1989.
- [23] MATOUŠEK, D. Aplikace procesoru ATmega644 v jazyce C. *Konstrukční elektronika A Radio*. 2011, č. 1.

## Seznam příloh:

*Příloha č. 1 – Schéma zapojení bloku IRC*

*Příloha č. 2 – Schéma zapojení bloku resolveru*

*Příloha č. 3 – Schéma zapojení bloku displeje*

*Příloha č. 4 – Schéma zapojení bloku napájecího zdroje a regulátoru*

*Příloha č. 5 – DPS bloku IRC*

*Příloha č. 6 – DPS bloku resolveru*

*Příloha č. 7 – DPS bloku displeje*

*Příloha č. 8 – DPS bloku napájecího zdroje a regulátoru*

*Příloha č. 9 – Výpis programu MCU pro blok IRC*

*Příloha č. 10 – Výpis programu MCU pro blok resolveru*

*Příloha č. 11 – CD (kompletní dokumentace)*